



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TREBALL FINAL DE GRAU

TÍTOL: ESTUDI I MILLORA DELS ALERONS DAVANTER I POSTERIOR D'UN FÓRMULA RENAULT MYGALE.

AUTOR: AMENGUAL COLOM, PEDRO

TITULACIÓ: GRAU EN ENGINYERIA MECÀNICA

DIRECTOR: MONTSERRAT CARBONELL VENTURA

DEPARTAMENT: MF – Departament de Mecànica de Fluids.

DATA DE PRESENTACIÓ: Febrer, 2018

RESUM

Aquest projecte es centra en realitzar l'estudi i millora dels alerons davanter i posterior d'un Formula Renault Mygale '96 des del punt de vista aerodinàmic. Expliquem des de l'inici la importància que té l'aerodinàmica en la competició.

En primer lloc es realitzarà un estudi bidimensional dels alerons actuals del monoplaça amb el programa XFLR5. Un cop obtinguts els primers resultats dels coeficients d'anti-sustentació (C_L) i d'arrossegament (C_D), fabricarem un model 3D dels alerons, a escala reduïda a partir d'un estudi de semblança, simulant en un túnel de vent les mateixes condicions actuals del monoplaça. Obtingudes les càrregues aerodinàmiques a partir de les presa de dades en el túnel de vent, obtenim els coeficients aerodinàmics i les comparem amb els calculats en l'estudi bidimensional.

Posteriorment, configurem els paràmetres per realitzar la simulació numèrica amb el programa Siemens NX (CFD) dissenyant els prototipus dels alerons actuals en CAD i comparant les simulacions entre l'experimental i la numèrica. Després, obtenim els resultats de les simulacions aplicant les modificacions estudiades amb el mateix software. Aquestes modificacions de millora seran un nou disseny i configuració dels alerons; optimitzant l'angle d'atac, i la implementació d'un sistema d'aleró actiu, similar al "DRS" de la Fórmula 1, que regula l'angle d'atac del perfil superior de l'aleró posterior segons les condicions del monoplaça i el tipus de circuit. A més comprovarem que els suports de subjecció dels alerons siguin fiables un cop realitzades les modificacions pertinents.

Finalment, per obtenir una conclusió empírica, determinem l'increment de millora dels nous alerons respecte als actuals i comprovarem les variacions dels tres estudis realitzats: l'estudi bidimensional (XFLR5), la simulació experimental (Túnel de vent) i la simulació numèrica tridimensional (Siemens NX).

Paraules clau (màxim 10):

ALERÓ	DRS	MONOPLAÇA	AERODINÀMICA
TUNEL DE VENT	SIEMENS NX	XFLR5	CFD
FEM	CAE		

ABSTRACT

This paper is a study and improvement of the “Formula Renault Mygale '96” front and rear wings from the aerodynamic point of view. In addition, the importance of the aerodynamic in a race has been explained from the beginning.

On the one hand, a two-dimensional study of the current wings of the car with the XFLR5 program will be carried out. Once the first results of the lift (C_L) and drag (C_D) coefficients have been obtained, we will produce a 3D model of the wings, at a reduced scale, simulating in a wind tunnel the same current conditions of the car. Once we have obtained the aerodynamic loads from the data collection in the wind tunnel, we also obtain the aerodynamic coefficients and compare them with those calculated in the two-dimensional study.

On the other hand, we set up the parameters to perform the digital simulation with the Siemens NX (CFD) software by designing the prototypes of the current wings in CAD and comparing both simulations, the experimental one and the numerical one. Then, we achieve the results of the simulations applying the modifications studied with the same software. These improvement modifications will be a new design and configuration of the wings; optimizing the angle of attack, and the implementation of an active spoiler system, similar to the “DRS” of Formula 1 which regulates the angle of attack of the upper profile of the rear wing according to the conditions of the single-seater and the race track type. In addition, we will verify that the supports of subjection of the wings are reliable once the relevant modifications have been made.

Finally, to sum up this paper, what is going to do is a comparison between the experimental results obtained with the wind tunnel, the two-dimensional (XFLR5) results achieved by calculation, and the results derived from three-dimensional numerical simulation (Siemens NX). In order to obtain an empirical conclusion, we will determine how the improvements of the new wings have risen compared to the current ones.

Keywords (10 maximum):

WING	DRS	SINGLE-SEATING	AERODYNAMIC
WIND TUNNEL	SIEMENS NX	XFLR5	CFD
FEM	CAE		

SUMARI

SUMARI DE FIGURES	6
SUMARI DE TAULES	12
GLOSARI	14
1. INTRODUCCIÓ	17
1.1. Motivació	17
1.2. Objectius del projecte	18
2. INTRODUCCIÓ A L'AERODINÀMICA	19
2.1. Marc teòric	19
2.2. Forces aerodinàmiques i equacions bàsiques	23
2.3. Tipologia de flux	26
3. L'AERODINÀMICA APLICADA A L'AUTOMOCIÓ	29
3.1. Història de l'aerodinàmica en la competició	29
3.2. Components aerodinàmics destacats	31
3.2.1. Alerons	32
3.2.1.1. Aleró davanter	32
3.2.1.2. Aleró posterior	33
3.2.1.2.1. Sistema "DRS"	34
3.2.1.3. Alerons laterals	37
3.2.2. Difusor i fons pla	38
3.2.3. Deflectors	38
3.3. Tipologia de perfils	39
4. ESTUDI BIDIMENSIONAL	47
4.1. Introducció al software XFLR5	47
4.2. Models a estudiar	48
4.2.1. Aleró davanter	48
4.2.2. Aleró posterior	57
4.3. Resultats de l'estudi bidimensional	68
5. SIMULACIÓ EXPERIMENTAL	70
5.1. Túnel de vent	70
5.2. Fabricació dels models en impressió 3D	75
5.2.1. Preparació dels models	75
5.2.1.1. Estudi de semblança	75
5.2.2. Preparació per a l'experimentació	81
5.3. Presa de dades	89
5.4. Resultats del túnel de vent	92

6. SIMULACIÓ NUMÈRICA	93
6.1. Introducció al software Siemens NX	93
6.1.1. Configuració del paràmetres del Siemens NX	93
6.2. Estudi previ dels alerons	107
6.2.1. Aleró davanter	107
6.2.2. Aleró posterior	113
6.2.3. Resultats de la simulació numèrica dels alerons actuals.	120
6.3. Proposta de millora	122
6.3.1. Modificacions de l'aleró davanter	122
6.3.2. Modificacions de l'aleró posterior	130
6.3.2.1. Disseny d'un sistema "DRS" actiu	136
6.3.2.1.1. Components del sistema	136
6.3.2.1.2. Viabilitat de funcionament	142
6.3.3. Resultats de la simulació numèrica dels alerons modificats	143
6.4. Comparativa dels resultats de la simulació numèrica entre els alerons actuals i els modificats.	145
6.5. Estudi mecànic	147
6.5.1. Aleró davanter	147
6.5.2. Aleró posterior	158
7. COMPARACIÓ DELS RESULTATS ENTRE L'ESTUDI BIDIMENSIONAL, LA SIMULACIÓ EXPERIMENTAL I LA SIMULACIÓ NUMÈRICA	165
8. PRESSUPOST	170
9. IMPACTE AMBIENTAL	172
10. CONCLUSIONS	173
11. AGRAÏMENTS	176
12. BIBLIOGRAFIA	177
ANNEX 1. Recull de plànols	
ANNEX 2. Taules	
ANNEX 3. Característiques tècniques "DRS"	

SUMARI DE FIGURES

2. INTRODUCCIÓ A L'AERODINÀMICA

Figura 2.1. Esquema de les forces resultants aplicades a un monoplaça.	19
Figura 2.2. Esquema de la capa límit d'un fluid en una placa plana.	21
Figura 2.3. Distribució de velocitats a la capa límit sobre una placa plana.	21
Figura 2.4. Força resultant, càrrega i resistència aerodinàmiques sobre un perfil alar invertit.	23
Figura 2.5. Equacions de Navier-Stokes.	27
Figura 2.6. Esquema representatiu del flux laminar i turbulent.	28

3. L'AERODINÀMICA APLICADA A L'AUTOMOCIÓ

Figura 3.1. El Chaparral 2E, el primer automòbil de competició amb alerons.	29
Figura 3.2. Formula 1 dels anys 70.	30
Figura 3.3. Formula 1 dels anys 80.	30
Figura 3.4. Jaguar XJR 12.	31
Figura 3.5. Monoplaça a estudiar.	32
Figura 3.6. Monoplaça de la Formula 1, estudiat en CFD.	33
Figura 3.7. Aleró posterior Formula Renault Mygale 1996.	33
Figura 3.8. Representació de les resistències en un aleró amb el DRS tancat.	34
Figura 3.9. Representació de les resistències en un aleró amb el DRS obert.	35
Figura 3.10. Esquema del mecanisme "Push up"	35
Figura 3.11. Esquema del mecanisme "Pods % Rockers"	35
Figura 3.12. Esquema del mecanisme "Pod Pull"	36
Figura 3.13. Sistema amb DRS desactivat.	36
Figura 3.14. Sistema DRS activat.	37
Figura 3.15. Winglets en un Formula 1 Renault 2006.	37
Figura 3.16. Difusor d'un monoplaça de Formula 1.	38
Figura 3.17. Deflector lateral d'un monoplaça de Fórmula 1.	38
Figura 3.18. Esquema conceptual de perfils.	39
Figura 3.19. Distribució de forces sobre el perfil i el centre de pressió.	40
Figura 3.20. Corbes característiques de un NACA 2410 i 2418.	41
Figura 3.21. Exemple d'un aleró d'un sol perfil. Audi R8 Audi Sport.	43
Figura 3.22. Configuració d'un aleró de dos elements amb flap extern.	44
Figura 3.23. Aleró posterior del monoplaça a estudiar amb configuració amb flap extern.	44
Figura 3.24. Configuració d'un aleró de dos elements amb flap de ranura.	45
Figura 3.25. Corbes característiques d'alerons en diferents configuracions.	45
Figura 3.26. Exemple d'un vòrtex generat en les ales d'un avió.	46
Figura 3.27. Element aerodinàmic d'un vehicle quotidià.	46

4. ESTUDI BIDIMENSIONAL

Figura 4.1. Caràtula del software XFLR5	47
Figura 4.2. Secció del perfil de l'aleró davanter.	48
Figura 4.3. Croquis de l'aleró davanter amb cotes generals.	49
Figura 4.4. Vista frontal de l'assemblatge de l'aleró davanter.	50
Figura 4.5. Vista posterior de l'assemblatge de l'aleró davanter.	50
Figura 4.6. Selecció d'unitats bàsiques per l'execució del programa XFLR5.	51
Figura 4.7. Esquema del perfil alar amb angle d'atac de 4°.	53
Figura 4.8. Tendència del coeficient d'anti-sustentació bidimensional (C_L) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça.	55
Figura 4.9. Tendència del coeficient d'arrossegament bidimensional (C_D) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça.	55
Figura 4.10. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça.	56
Figura 4.11. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça.	56
Figura 4.12. Croquis de la secció 1 de l'aleró posterior.	57
Figura 4.13. Secció nº1 del perfil posterior.	57
Figura 4.14. Distribució de pressions i capa límit de la secció 1 del perfil de l'aleró posterior.	58
Figura 4.15. Tendència del coeficient d'anti-sustentació bidimensional (C_L) de la secció nº1 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	59
Figura 4.16. Tendència del coeficient d'arrossegament bidimensional (C_D) de la secció nº1 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	60
Figura 4.17. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) de la secció nº1 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	60
Figura 4.18. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) de la secció nº1 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	61
Figura 4.19. Tendència de la força d'anti-sustentació bidimensional (F_L) respecte la força d'arrossegament (F_D) de la secció nº1 de l'aleró posterior.	61
Figura 4.20. Cotes generals de la secció 2 de l'aleró posterior.	62
Figura 4.21. Secció nº2 del perfil posterior.	62
Figura 4.22. Distribució de pressions i capa límit de la secció 2 del perfil de l'aleró posterior.	63
Figura 4.23. Tendència del coeficient de anti-sustentació bidimensional (C_L) de la secció nº2 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	64
Figura 4.24. Tendència del coeficient d'arrossegament bidimensional (C_D) de la secció nº2 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	64
Figura 4.25. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) de la secció nº2 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	65
Figura 4.26. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) de la secció nº2 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	65
Figura 4.27. Assemblatge del aleró posterior del monoplaça.	66
Figura 4.28. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) total de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	67

Figura 4.29. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) total de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça.	67
Figura 4.30. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) total aportada pel conjunt d'alerons al monoplaça en relació a la velocitat.	68
Figura 4.31. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) total aportada pel conjunt d'alerons al monoplaça en relació a la velocitat.	69

5. SIMULACIÓ EXPERIMENTAL

Figura 5.1. Esquema del tipus de túnel de vent segons la circulació. A: Túnel obert, B: Túnel tancat.	70
Figura 5.2. Esquema del tipus de túnel de vent segons la velocitat del Fluid.	71
Figura 5.3. Túnel de vent utilitzat del campus de Terrassa (ESEIAAT).	73
Figura 5.4. Cambra d'assajos oberta del túnel de vent utilitzat (ESEIAAT).	74
Figura 5.5. Impressió d'una de les parts del perfil de l'aleró.	82
Figura 5.6. Impressió de l'aleró davanter a escala 1/5 en dues parts.	82
Figura 5.7. Impressió de la meitat de l'aleró davanter a escala 1/2.5 per parts.	83
Figura 5.8. Material utilitzat per la realització dels models.	83
Figura 5.9. Perfil a escala 1/5.	84
Figura 5.10. Assemblatge del perfil a escala 1/2.5 sense tractament superficial.	84
Figura 5.11. Preparació per realitzar el tractament superficial.	85
Figura 5.12. Vista general de l'aleró amb els punts d'acollada de la cambra d'assajos.	86
Figura 5.13. Vista de perfil de l'aleró amb els punts d'acollada de la cambra d'assajos.	87
Figura 5.14. Vista de perfil de l'aleró amb els punts d'acollada a les bascules.	88
Figura 5.15. Detall de les bàscules utilitzades per la realització de l'assaig.	89
Figura 5.16. Captació de la velocitat del flux del túnel de vent.	89
Figura 5.17. Calibratge de les bascules i creació de la matriu.	90
Figura 5.18. Taula de resultats un cop aplicada la matriu de correcció.	91

6. SIMULACIÓ NUMÈRICA

Figura 6.1. Caràtula del Software Siemens NX.	93
Figura 6.2. Bloc d'aire del túnel de vent.	95
Figura 6.3. Creació dels arxius FEM i SIM.	95
Figura 6.4. Malla tetraèdrica "TET10" amb mesura de l'element de 20 mm.	96
Figura 6.5. Aplicació de "control de malla".	96
Figura 6.6. Determinació del flux d'entrada.	97
Figura 6.7. Obertura a atmosfera.	97
Figura 6.8. Condició de frontera a pressió atmosfèrica.	98
Figura 6.9. Informe de les càrregues aerodinàmiques.	99
Figura 6.10. Detalls de la solució.	99
Figura 6.11. Unitats de la solució.	100

Figura 6.12. <i>Condicions ambient.</i>	101
Figura 6.13. <i>Flux 3D.</i>	101
Figura 6.14. <i>Opcions del resultat.</i>	102
Figura 6.15. <i>Paràmetres del “solver” 1.</i>	103
Figura 6.16. <i>Paràmetres del “solver” 2.</i>	104
Figura 6.17. <i>Paràmetres del “solver” 3.</i>	104
Figura 6.18. <i>Paràmetres del “solver” 4.</i>	105
Figura 6.19. <i>Velocitats aleró davanter.</i>	105
Figura 6.20. <i>Pressió a l'aleró davanter.</i>	106
Figura 6.21. <i>Malla 2D utilitzada en l'aleró davanter.</i>	107
Figura 6.22. <i>Condicions de contorn necessàries per realitzar la simulació.</i>	108
Figura 6.23. <i>Velocitats absolutes a traves de l'aleró davanter.</i>	109
Figura 6.24. <i>Increment de pressió relativa a l'aleró davanter.</i>	109
Figura 6.25. <i>Tendència del coeficient d'anti-sustentació 3D (C_L) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça.</i>	110
Figura 6.26. <i>Tendència del coeficient d'arrossegament 3D (C_D) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça.</i>	111
Figura 6.27. <i>Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça.</i>	111
Figura 6.28. <i>Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça.</i>	112
Figura 6.29. <i>Determinació del mallat del volum d'aire utilitzat per la prova.</i>	113
Figura 6.30. <i>Control de malla de les dimensions de les cares del perfil de 5 mm.</i>	114
Figura 6.31. <i>Esquema representatiu de la configuració dels perfils posterior</i> <i>Originals</i>	114
Figura 6.32. <i>Malla 2D utilitzada per l'aleró posterior.</i>	115
Figura 6.33. <i>Dades per l'obtenció dels coeficients d'arrossegament i de sustentació.</i>	115
Figura 6.34. <i>Velocitats absolutes a traves de l'aleró posterior.</i>	116
Figura 6.35. <i>Increment de pressió relativa a l'aleró posterior.</i>	117
Figura 6.36. <i>Tendència del coeficient d'anti-sustentació 3D (C_L) de l'aleró posterior sense modificació en relació a la velocitat del monoplaça.</i>	118
Figura 6.37. <i>Tendència del coeficient d'arrossegament 3D (C_D) de l'aleró posterior sense modificació en relació a la velocitat del monoplaça.</i>	118
Figura 6.38. <i>Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) de l'aleró posterior sense modificació en relació a la velocitat del monoplaça.</i>	119
Figura 6.39. <i>Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) de l'aleró posterior sense modificació en relació a la velocitat del monoplaça.</i>	119
Figura 6.40. <i>Tendència de la força de sustentació tridimensional (F_L) total aportada al monoplaça pel conjunt d'alerons sense modificar en relació a la velocitat.</i>	120
Figura 6.41. <i>Tendència de la força d'arrossegament tridimensional (F_D) total aportada al monoplaça pel conjunt d'alerons sense modificar en relació a la velocitat.</i>	121
Figura 6.42. <i>Coeficient d'arrossegament (C_D) respecte l'angle d'atac.</i>	122
Figura 6.43. <i>Coeficient d'anti-sustentació (C_L) respecte l'angle d'atac.</i>	123

Figura 6.44. Plànol de cotes generals.	124
Figura 6.45. Croquis de l'aleró davanter amb la primera modificació i amb cotes.	124
Figura 6.46: Monoplaça de la Formula 1, estudiant el punts crítics vistos des del punt de l'aerodinàmica en CFD.	126
Figura 6.47. Aleró davanter modificat.	127
Figura 6.48. Tendència del coeficient d'anti-sustentació 3D (C_L) de l'aleró davanter modificat en relació a la velocitat del monoplaça.	128
Figura 6.49. Tendència del coeficient d'arrossegament 3D (C_D) de l'aleró davanter modificat en relació a la velocitat del monoplaça.	128
Figura 6.50. Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) de l'aleró davanter modificat en relació a la velocitat del monoplaça.	129
Figura 6.51. Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) de l'aleró davanter modificat en relació a la velocitat del monoplaça.	129
Figura 6.52. Coeficient d'arrossegament (C_D) respecte l'angle d'atac (α).	130
Figura 6.53. Coeficient d'anti-sustentació (C_L) respecte l'angle d'atac (α).	131
Figura 6.54. Modificació als angles d'atac òptim de l'aleró posterior.	132
Figura 6.55. Diagrama de velocitats amb la configuració de l'aleró posterior modificat.	132
Figura 6.56. Diagrama de pressions amb la configuració de l'aleró posterior modificat.	133
Figura 6.57. Tendència del coeficient d'anti-sustentació 3D (C_L) de l'aleró posterior modificat en relació a la velocitat del monoplaça.	134
Figura 6.58. Tendència del coeficient d'arrossegament 3D (C_D) de l'aleró posterior modificat en relació a la velocitat del monoplaça.	134
Figura 6.59. Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) de l'aleró posterior modificat en relació a la velocitat del monoplaça.	135
Figura 6.60. Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) de l'aleró posterior modificat en relació a la velocitat del monoplaça.	135
Figura 6.61. Gràfica del parell màxim del motor [N.mm] respecte al temps.	138
Figura 6.62. Components de la força vectorial màxima.	139
Figura 6.63. Gràfica del parell màxim real del motor [N.mm] respecte al temps aplicant la força a 24°.	139
Figura 6.64. Comparativa de motors amb característiques similars entre 4-6 Nm de parell motor màxim.	140
Figura 6.65. Comparativa de motors amb les mateixes característiques però diferents velocitats.	141
Figura 6.66. Esquema del perfil "DRS" amb angle d'atac mínim de 0°.	142
Figura 6.67. Esquema del perfil "DRS" amb angle d'atac màxim de 37.19°	142
Figura 6.68. Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) total del conjunt d'alerons modificats en relació a la velocitat del monoplaça.	144
Figura 6.69. Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) total del conjunt d'alerons modificats en relació a la velocitat del monoplaça.	144
Figura 6.70. Comparativa de les forces aerodinàmiques (F_L i F_D) dels alerons actuals i els modificats respecte de la velocitat del monoplaça.	145
Figura 6.71. Tendència de l'increment de la força de sustentació 3D (F_L) total entre els alerons actuals i els modificats en relació a la velocitat del monoplaça.	146

Figura 6.72. Tendència de l'increment de la força d'arrossegament 3D (F_D) total entre els alerons actuals i els modificats en relació a la velocitat del monoplaça.	146
Figura 6.73. Configuració dels paràmetres de força de la fibra de carboni.	149
Figura 6.74. Configuració dels paràmetres mecànics de la fibra de carboni.	149
Figura 6.75. Característiques principals de l'aleró davanter.	150
Figura 6.76. Mallat de l'aleró davanter.	150
Figura 6.77. Afinament del mallat al voltant dels punts crítics.	151
Figura 6.78. Mallat final de la part crítica de l'aleró.	151
Figura 6.79. Esquema qualitatiu de la distribució de les forces aplicades.	152
Figura 6.80. Esquema qualitatiu de les pressions resultants i el seu punt d'aplicació.	152
Figura 6.81. Aplicació de les càrregues aerodinàmiques.	153
Figura 6.82. Desplaçament vertical en "Y".	153
Figura 6.83. Representació del l'esforç de von misses.	154
Figura 6.84. Esquema quantitatiu de les forces de reacció aplicades en el punts de collada.	155
Figura 6.85. Mallat de l'aleró davanter.	159
Figura 6.86. Afinament del mallat al voltant dels punts crítics.	160
Figura 6.87. Aplicació de les càrregues aerodinàmiques i restriccions.	161
Figura 6.88. Desplaçament vertical en "X".	161
Figura 6.89. Representació del l'esforç de Von Misses.	162

7. COMPARACIÓ DELS RESULTATS ENTRE L'ESTUDI BIDIMENSIONAL, LA SIMULACIÓ EXPERIMENTAL I LA SIMULACIÓ NUMÈRICA

Figura 7.1. Comparació dels valors del coeficient de sustentació (C_L) bidimensional, numèric i experimental respecte l'angle d'atac.	166
Figura 7.2. Comparació dels valors del coeficient d'arrossegament (C_D) bidimensional, numèric i experimental respecte l'angle d'atac.	166

8. PRESSUPOST

Figura 8.1. Fabricació utilitzant la fibra de carboni.	170
---	-----

9. IMPACTE AMBIENTAL

Figura 9.1. Acreditacions AENOR.	172
---	-----

SUMARI DE TAULES

4. ESTUDI BIDIMENSIONAL

Taula 4.1. <i>Taula resum del nombre de Reynolds i Mach segons la velocitat de l'aleró davanter.</i>	51
Taula 4.2. <i>Característiques del perfil alar de l'aleró davanter.</i>	53
Taula 4.3. <i>Resum de resultats de l'aleró davanter amb angle d'atac de 4°</i>	54
Taula 4.4. <i>Característiques de la secció 1 del perfil de l'aleró posterior.</i>	58
Taula 4.5. <i>Resum de resultats de la secció 1 de l'aleró posterior amb angle d'atac de 20°.</i>	59
Taula 4.6. <i>Característiques de la secció 2 del perfil de l'aleró posterior.</i>	62
Taula 4.7. <i>Resum de resultats de la secció 2 de l'aleró posterior amb angle d'atac de 4°</i>	63
Taula 4.8. <i>Resum de resultats de l'aleró posterior</i>	66
Taula 4.9. <i>Resum resultats de l'estudi bidimensional.</i>	68

5. SIMULACIÓ EXPERIMENTAL

Taula 5.1. <i>Magnituds de les variables estudiades.</i>	77
Taula 5.2. <i>Jerarquia dels paràmetres de semblança segons la seva importància depenent el tipus de test.</i>	79
Taula 5.3. <i>Paràmetres de l'assaig.</i>	91
Taula 5.4. <i>Resultats obtinguts de la simulació experimental a partir del túnel de vent a l'angle d'atac de 4°.</i>	92

6. SIMULACIÓ NUMÈRICA

Taula 6.1. <i>Resum dels resultats 3D de l'aleró davanter amb angle d'atac de 4°.</i>	110
Taula 6.2. <i>Resum dels resultats 3D de l'aleró posterior</i>	117
Taula 6.3. <i>Resum resultats de la simulació numèrica dels alerons actuals.</i>	120
Taula 6.4. <i>Resum de l'increment de les càrregues de l'aleró davanter amb estudi 2D</i>	125
Taula 6.5. <i>Comparativa de les propostes de millora envers a l'aleró original a partir de l'estudi tridimensional.</i>	126
Taula 6.6. <i>Resum dels resultats 3D de l'aleró davanter modificat.</i>	127
Taula 6.7. <i>Resum dels resultats 3D de l'aleró posterior modificat.</i>	133

Taula 6.8 Forces aerodinàmiques depenent de l'angle d'atac configurat pel sistema "DRS"	137
Taula 6.9. Resum dels resultats 3D de l'aleró posterior amb el "DRS" amb l'angle mínim.	142
Taula 6.10. Resum dels resultats 3D de l'aleró posterior amb el "DRS" amb l'angle mínim.	143
Taula 6.11. Resum resultats de la simulació numèrica dels alerons modificats amb el DRS a 12°.	143
Taula 6.12. Comparativa dels resultats de la simulació numèrica entre els alerons actuals i els modificats.	145
Taula 6.13. Comparativa de càrregues aerodinàmiques del l'aleró davanter en 2D i 3D	147
Taula 6.14. Propietats de la fibra de carbono	148
Taula 6.15. Dades de les tensions en el punt més sol·licitat	154
Taula 6.16. Reaccions calculades a partir del software NX.	155
Taula 6.17. Característiques mecàniques dels acers dels cargols, femelles i volanderes.	156
Taula 6.18. Comparativa de càrregues aerodinàmiques del l'aleró posterior en 2D i 3D	158
Taula 6.19. Propietats de l'aleró posterior.	159
Taula 6.20. Reaccions calculades a partir del software NX.	163
Taula 6.21. Característiques mecàniques dels acers dels cargols, femelles i volanderes.	163

7. COMPARACIÓ DELS RESULTATS ENTRE L'ESTUDI BIDIMENSIONAL, LA SIMULACIÓ EXPERIMENTAL I LA SIMULACIÓ NUMÈRICA

Taula 7.1. Comparació dels resultats obtinguts de la simulació experimental amb el càlcul bidimensional i la simulació numèrica a l'angle d'atac de 4°.	165
--	-----

8. PRESSUPOST

Taula 8.1. Desglossament del pressupost orientatiu per la fabricació i aplicació de les modificacions de l'aleró davanter.	170
Taula 8.2. Desglossament del pressupost orientatiu per la fabricació i aplicació de les modificacions de l'aleró posterior.	171
Taula 8.3 Resum del cost total del pressupost.	171

GLOSSARI

Aleró: Referent a automòbils de competició, els alerons es col·loquen invertits respecte als dels avions de manera que empeny el vehicle cap avall.

-“DRS”: “Drag Reduction System”. Aleró posterior mòbil d'un monoplaça, dispositiu introduït en la temporada 2011 de la Formula 1 que serveix per reduir la càrrega aerodinàmica i així augmentar la velocitat del monoplaça per facilitar els avançaments.

Monoplaça: Vehicle que disposa d'una sola plaça, en àmbits d'automòbils de competició estan referenciats en particular a l'automobilisme de velocitat.

Extradós: Respecte a l'automoció, és la superfície inferior corba d'un perfil aerodinàmic. És on es presenta menys pressió i major velocitat.

Intradós: Respecte a l'automoció, és la superfície superior corba d'un perfil aerodinàmic. És on es presenta més pressió i menor velocitat.

NACA: Fou una agència federal de EEUU per emprendre, fomentar i institucionalitzar les investigacions aeronàutiques.

CAD: “Computer-aided design”. Disseny assistit per ordinador.

CAE: “Computer-aided engineering”. Enginyeria assistida per ordinador.

FEM: Mètode dels elements finits, és un mètode numèric general per l'aproximació de solucions d'equacions diferencials molt complexes.

CFD: “Computational Fluid Dynamics”. És una de les branques de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i algorismes per resoldre els problemes de fluid.

“Datasheet”: Fitxa tècnica o document que resumeix el funcionament i altres característiques d'un component.

Corda: Amplada del perfil de l'aleró.

Envergadura: Longitud del perfil de l'aleró.

Plàstic ABS: Acrilonitril butadiè estirè és un plàstic molt resistent a l'impacte. Molt utilitzat en automoció i altres usos industrials.

Fibra de carbono: És una fibra sintètica constituïda per fins filaments de 5-10µm de diàmetre i compost principalment per carbono. L'aplicació principal és la fabricació de materials compostos.

Acetona: És un compost químic de fórmula $\text{CH}_3(\text{CO})\text{CH}_3$. L'acetona sintetitzada s'utilitza en la fabricació de plàstics, fibres, medicaments i altres productes químics.

Vòrtex: Estela turbulenta de forma de remolí creada pels perfils alars en els seus extrems.

“Mygale”: És un fabricant francès d'automòbils de carreres que s'especialitza en la producció de xassís monoplaça per l'ús en la competició.

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Motivació

El projecte sorgeix a partir d'una conversa amb l'amo del fórmula Renault Mygale '96 que procedirem a estudiar, aficionat a la mecànica i a la competició.

El monoplaça Renault Mygale '96 és un fórmula de l'any 1996 que actualment està considerat com un vehicle històric procedent de la copa Renault de competició de l'any 1996. La denominació "Mygale" és deguda a que Renault es va associar amb l'empresa "Mygale" que aquesta va ser la que va dissenyar i fabricar el xassís del monoplaça entre altres parts que dissenyaren conjuntament. Nosaltres, ens vam proposar fer un estudi de les possibles millores que podíem aconseguir de cara al Campionat de Balears de Muntanya, com són; una millora mecànica del motor, una millora mecànica de la suspensió, millorar la caixa de canvis o millorar l'aerodinàmica.

Per una banda, en diferents revistes i articles tècnics ja vam observar que les constructores de vehicles tenien un gran interès en l'aerodinàmica i ens vam decantar per aquesta darrera opció. El tema de l'aerodinàmica era un punt al qual a priori no sabíem exactament fins on podíem arribar per poder completar el projecte amb èxit.

Un dels motius principals pels quals ens vam decantar per aquesta opció és perquè la relació entre el baix cost i l'obtenció notable de millora podria anar lligat de la mà. En canvi, qualsevol modificació en la part mecànica del monoplaça ens duria a un projecte extremadament complex i molt costós.

Per altra banda, ens vam centrar amb una millora aerodinàmica perquè el monoplaça ja tenia present uns alerons davanter i posterior muntat, i amb aquests podíem estudiar la capacitat de càrrega aerodinàmica que ja tenen i sobre aquests modificar-los per aconseguir la millora que estem cercant. El monoplaça, respecte a aerodinàmica, té aspectes millorables, sobretot observant les modificacions que hi ha actualment en la Fórmula 1. Doncs, des de fa uns anys he tingut gran interès per el món de l'automoció i he tingut l'oportunitat de trobar un tema que penso que té molt de potencial com és fer un estudi aerodinàmic complet.

Avui en dia, l'aerodinàmica té un paper fonamental en el disseny dels vehicles, ja bé siguin vehicles quotidians o vehicles de competició. Aquest fet és degut ni més ni manco a que un bon estudi aerodinàmic és directament proporcional a una millora de l'eficiència energètica del vehicle.

Ha arribat un moment en que ja no es poden millorar més els motors de combustió interna (MCIA) dels vehicles perquè tinguin les mateixes prestacions o prestacions superiors i consumeixin menys, les millores són molt costoses i amb dificultats. Per aquest fet la majoria de marques d'automòbils han apostat dur per millorar l'aerodinàmica dels seus vehicles ja que aquesta està menys desenvolupada.

1.2. Objectius del projecte

- Fer un estudi general de la càrrega aerodinàmica actual dels alerons del monoplaça.
- Aplicar els coneixements adquirits de mecànica de fluids i sobretot de flux extern.
- Augmentar el potencial del monoplaça per aconseguir millors resultats en les competicions que realitza sense fer una gran modificació.
- Implementar un sistema "DRS" en l'aleró posterior que estigui controlat automàticament per l'angle de gir del volant.
- Comprovar la viabilitat del projecte assegurant una millora per sobre de la situació actual.

2. L'AERODINÀMICA

En aquest apartat hem utilitzat la bibliografia [1], [3], [5], [7], [21], [24]

2.1. Marc Teòric.

Aerodinàmica.

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que estudia la interacció entre un cos sòlid i un fluid, normalment extern, on existeix moviment relatiu entre els dos i el fluid és un gas. En l'estudi de flux extern les forces resultants més importants són la força de sustentació i la força de resistència o d'arrossegament.

Quan un flux incideix sobre un cos es crea una força resultant sobre el cos que es pot descompondre en una component normal i una component tangencial. La component de la força resultant sobre el cos que actua en direcció del flux és la força d'arrossegament i la component que actua normal al flux és la força de sustentació.

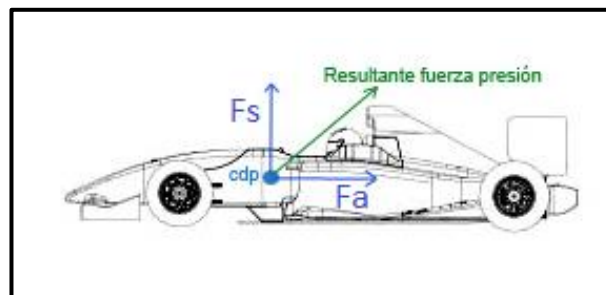


Figura 2.1. Esquema de les forces resultants aplicades a un monoplaça. [21]

En la figura 2.1 s'observa l'esquema de les forces aerodinàmiques actuant sobre un monoplaça. La component vertical " F_s " és la força de sustentació i la component horitzontal " F_a " és la força d'arrossegament. Per un bon disseny d'un monoplaça es desitja obtenir una força de sustentació negativa o càrrega aerodinàmica " $-F_s$ " òptima i disminuir la força d'arrossegament. Aquí és on intervé l'estudi aerodinàmic de cada vehicle.

La càrrega aerodinàmica ($-F_s$) és la força que actua sobre els alerons i parts aerodinàmiques del vehicle contra el terra. Aquesta força fa que el cotxe tingui més capacitat d'aferrar-se al sòl i millorar l'adherència dels pneumàtics per poder tenir una major estabilitat i control del vehicle.

A més de la resistència aerodinàmica ens trobem la resistència de rodament que és principalment per la deformació del pneumàtic sobre el sòl. Aquesta depèn del pes de vehicle, l'estat del paviment i sobre tot de l'estat del pneumàtic i de la pressió d'inflat. Després de la resistència aerodinàmica, és la segona força més important a l'hora de dificultar el moviment del nostre vehicle sobre el paviment. També és la més important a baixes velocitats.

Per altra banda ens trobem la resistència per pendent que depèn del pes del vehicle. En un tram ascendent està en contra en canvi en un tram descendent ens va a favor de la direcció de la velocitat. Finalment, també hem de considerar la resistència per acceleració ja que en una cursa, l'acceleració pot ser significativa. Segons la segona llei de Newton és el producte de la massa del vehicle per l'acceleració.

Aplicant les equacions de Newton obtenim el següent;

$$\begin{aligned} F_s &= \mu * N \\ N &= m * g + F_s \end{aligned}$$

F_s : força d'adherència (N)

m : massa (kg)

g : acceleració de la gravetat (m/s^2)

μ : coeficient de fregament del terra (Adimensional)

N : força normal (N)

La força d'adherència amb el sòl, F_s , és el coeficient de fregament del terra multiplicat per la força normal resultant i aquesta normal és el pes del vehicle més la càrrega aerodinàmica.

Es pot veure clarament que com més càrrega aerodinàmica tingui el vehicle més força de fregament obtindrem. Aquest fet ens implica millorar el pas per corba en un circuit de competició, i així millorar el temps per volta.

Capa límit

Es dedueix com a capa límit d'un cos sotmès a un fluid per la regió compresa entre el contacte amb la superfície que té velocitat zero fins a la velocitat màxima del fluid. Aquesta distribució és deguda a la fricció del fluid viscos sobre la superfície del sòlid provocant una tensió de cisalla proporcional al gradient de velocitat, com es pot veure en la figura 244.

$$\tau = \mu * \frac{d_v}{d_y}$$

Aquesta formula ens determina l'esforç viscos i ve determinat per la viscositat (μ) i el gradient de velocitats ($\frac{d_v}{d_y}$).

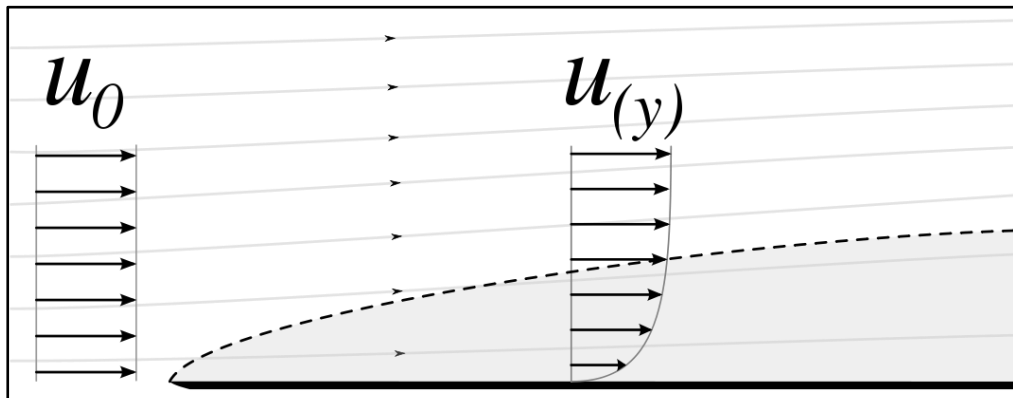


Figura 2.2. Esquema de la capa límit d'un fluid en una placa plana. [17]

L'estudi de la capa límit (figura 2.2) d'un cos sotmès a un flux ens serveix per obtenir les forces viscoses just a la superfície del sòlid i determinar interacció amb el flux ideal.

L'espessor de la capa límit ve determinada per la distància que aquest recórrer sobre el sòlid. S'assoleix al 99% de la velocitat exterior i ve determinat per el flux laminar, el punt de transició i el flux turbulent com veiem en la figura 2.3.

$$u = 0.99 * U_{\infty} \approx U_{\infty}$$

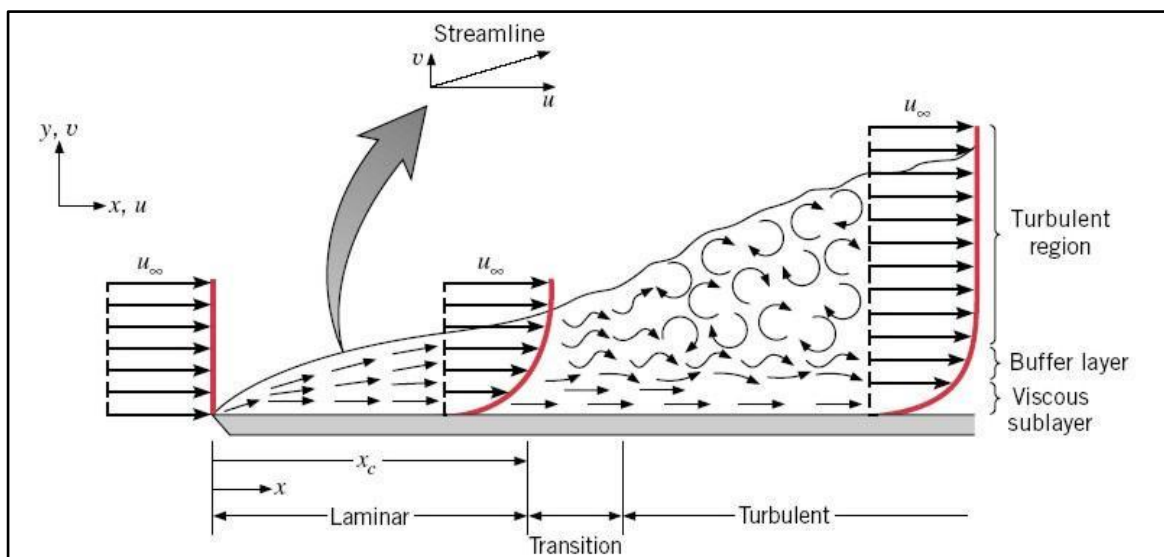


Figura 2.3. Distribució de velocitats en la capa límit sobre una placa plana. [17]

Per determinar la transició de la capa límit, depèn del n° de Reynolds definit com:

$$Re_x = \frac{\rho * U * x}{\mu}$$

On ρ és la densitat (kg/m^3), μ és la viscositat dinàmica (kg/ms), U és la velocitat del corrent lliure (m/s) i x és la distància a la bora d'atac (m).

Per acabar cal determinar el nombres de Reynolds per els quals ens trobem en capa límit laminar, turbulenta o en zona de transició.

- Capa límit laminar:

$$Re_x < 5 * 10^5$$

- Capa límit turbulenta:

$$Re_x \geq 3 * 10^6$$

- Zona de transició:

$$5 * 10^5 \leq Re_x \leq 3 * 10^6$$

Per determinar l'espessor de la capa límit utilitzem l'equació de Blassius per la capa límit laminar:

$$\frac{\delta}{x} = \frac{5}{Re_x^{1/2}}$$

En el cas que tinguem la capa límit turbulenta utilitzarem;

$$\frac{\delta}{x} = \frac{0.38}{Re_x^{1/5}}$$

On δ és el gruix de la capa límit (m), x és la distància a la bora d'atac (m).

2.2. Forces aerodinàmiques i equacions bàsiques

Fet aquest primer incís de les forces més importants en l'àmbit de l'aerodinàmica procedirem a descriure més detalladament les forces que actuen sobre els vehicles.

Força aerodinàmica

El fluid que travessa un perfil alar en moviment crea una força aerodinàmica resultant d'una variació de velocitats en les diferents parts del perfil, en la part superior la velocitat és menor, en canvi en la part posterior la velocitat del fluid és major i es crea una depressió.

Aquesta força aerodinàmica es descompon en dues forces conegudes; la força de càrrega aerodinàmica o sustentació negativa (F_L) i la força d'arrossegament de l'aleró o resistència aerodinàmica (F_D).

$$\vec{F} = \vec{F}_L + \vec{F}_D$$

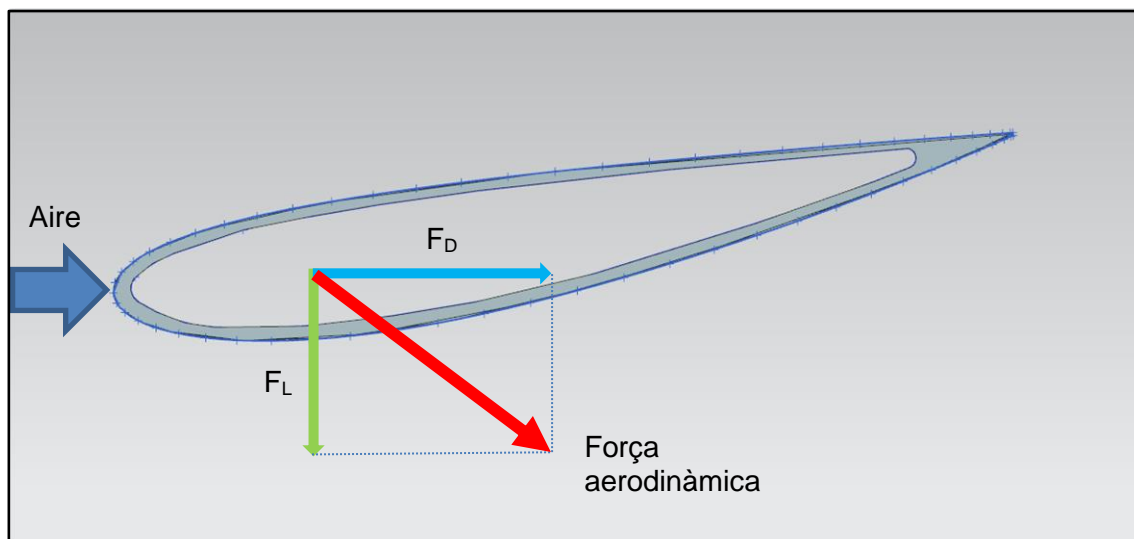


Figura 2.4. Força resultant, càrrega i resistència aerodinàmiques sobre un perfil alar invertit. [Autor].

Càrrega aerodinàmica

Com podem veure en la figura 2.4, la càrrega aerodinàmica és la component vertical de la força aerodinàmica i resulta ser perpendicular a la direcció del flux. Aquesta component és l'encarregada de mantenir el vehicle al terra però es pot veure modificada degut a:

- Una major superfície alar.
- Major velocitat.
- Major densitat del fluid.
- Una forma diferent del perfil alar o un angle d'atac major.

La càrrega aerodinàmica ens ve donada per la fórmula:

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * A * C_L$$

On F_L és la càrrega aerodinàmica (N), ρ és la densitat del fluid ($\frac{Kg}{m^3}$), V és la velocitat relativa entre el fluid i el cos ($\frac{m}{s}$), A és la superfície alar (m^2), i C_L és el coeficient de sustentació (Adimensional).

Observant l'equació, deduïm que el factor que determina un increment quadràtic de la força aerodinàmica és la velocitat. Els altres factors no influiran tant ja que la densitat podem considerar-la constant a tots els càlculs, l'àrea de l'aleró tindrà petites variacions poc influents i el coeficient de sustentació dependrà de cada perfil i la seva configuració.

Per altre banda l'augment de la càrrega aerodinàmica té les seves avantatges i els seus inconvenients. L'avantatge principal és fonamentalment l'increment d'adherència del fórmula amb el terra, en canvi l'inconvenient és que a mesura que incrementem la velocitat i la càrrega aerodinàmica el vehicle tindrà que fer un subministrament extra de potència o el que és el mateix, tindrem una part de potència generada per el monoplaça que serà absorbida per aquest fenomen.

Observant que la potència és el producte de la força per la velocitat,

$$P_z = F_z * V$$

substituïm F_z i obtenim:

$$P_L = \left(\frac{1}{2} * \rho * V^2 * A * C_L \right) * V = \frac{1}{2} * \rho * A * C_L * V^3$$

Resistència aerodinàmica

La resistència aerodinàmica és la component horitzontal, paral·lela a la direcció del flux, de la força aerodinàmica creada sobre l'aleró i sempre va en contra del moviment del vehicle. Es divideix en dues forces, la força deguda a la pressió (F_P) i la força deguda a la fricció (F_F).

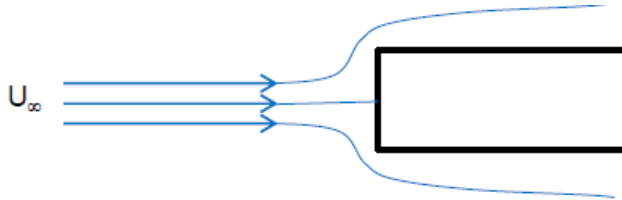
$$F_D = F_F + F_P$$

- La resistència a la superfície, o de Fricció. (F_F) és deguda als esforços tangencials i venen donats per l'àrea de la superfície i la llargària del cos.



Exemple: placa prima paral·lela al flux ($F_D = F_F$) $F_p \approx 0$

- La resistència de forma o de Pressió. (F_p) són forces degudes a les diferències de pressió en el cos i venen donades per l'àrea normal al flux.



Finalment, la força F_D també ens ve donada per l'equació:

$$F_D = \frac{1}{2} * \rho * V^2 * A * C_D$$

On F_D és la força de resistència (N), ρ és la densitat del fluid ($\frac{Kg}{m^3}$), V és la velocitat relativa ($\frac{m}{s}$), A és la superfície alar (m^2), i C_D és el coeficient de resistència (adimensional).

Amb la variació de la resistència a l'avanç degut al coeficient d'arrossegament dels perfils (C_D) ens trobem que aquesta repercuteix amb la velocitat màxima que assolix el monoplaça i es podria deduir aplicant l'equació:

$$Pot = \frac{A * V^3 * C_D}{\rho}$$

On Pot és la potència subministrada pel motor del monoplaça (W), A és l'àrea (m^2), V és la velocitat relativa ($\frac{m}{s}$), C_D és el coeficient d'arrossegament (adimensional) i ρ és la densitat del fluid ($\frac{Kg}{m^3}$).

Eficiència aerodinàmica.

El concepte d'eficiència aerodinàmica és un dels punts més importants a tenir en compte a l'hora de plantejar la millora de disseny dels alerons per poder obtenir uns valors de funcionament òptims.

Aquest concepte aquest concepte ve donat pel quocient entre els coeficients de sustentació i d'arrossegament.

$$Ef = \frac{C_L}{C_D}$$

A simple vista veiem que la configuració de funcionament òptima seria un elevat coeficient de sustentació amb un menor coeficient d'arrossegament i així obtenir una major eficiència aerodinàmica.

2.3. Tipologia del flux

Cal classificar el fluid depenent de les condicions a les quals es veurà sotmès. En primer lloc, tindrem que determinar la relació de la velocitat respecte a la velocitat del so amb el paràmetre adimensional de Mach que ve donat per l'equació.

$$M = \frac{v}{v_s}$$

On v és la velocitat del fluid (m/s) i v_s és la velocitat del so (m/s).

Un cop calculat el nombre de Mach ja podem fer una primera classificació del fluid determinat per:

- $M < 1$, on la velocitat del fluid és menor que la velocitat del so, seria un flux subsònic.
- $M > 1$, on la velocitat del fluid és major que la velocitat del so, seria un flux supersònic.
- $M = 1$, on la velocitat del fluid és igual a la del so, seria un flux transsònic.

Per altra banda, per calcular la velocitat del so en el nostre cas a 25°C utilitzarem l'equació.

$$v_s = \sqrt{\gamma * R' * T}$$

On γ és la constant adiabàtica (degut que l'aire es modela com un gas diatòmic la constant es 1,4), R' és la constant específica del gas (J/kg.K) i la T és la temperatura en Kelvin (K)

Substituint valors obtenim la velocitat del so en l'aire a 25°C

$$v_s = \sqrt{1.4 * 287 * (273.2 + 25)} = 346 \frac{m}{s}$$

Fluid compressible i incompressible.

Una vegada que podem obtenir el nombre de Mach per a totes les velocitats en les que es veurà sotmès el nostre aleró podríem determinar que ens trobem amb un cas de flux incompressible.

Afirmem que el fluid és incompressible quan el valor de la velocitat és menor de $0.3 \cdot M$, on M és el nombre de Mach. Aquests valors son vàlids per velocitats inferior a 100 m/s. En el nostre cas la velocitat màxima que pot assolir el monoplaça és de 50 m/s així que seria correcte la hipòtesi.

Cal anar en compte si la densitat es veu modificada perquè podria sobrepassar el límit de $0.3 \cdot M$ i estaríem amb fluid compressible.

Fluid viscos.

En aquest cas un cop determinat que ens trobem amb un fluid incompressible, cal determinar si el fluid és no viscos o viscos. Si el fluid fos no viscos direm que és un fluid ideal i ens regirem per les equacions d'Euler a l'hora de fer la resolució. En canvi, en el nostre cas ens trobem amb un fluid viscos i són necessàries les equacions de Navier-Stokes per la seva resolució com mostra la figura 2.5.

$$\begin{aligned} \rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) &= \mu \left[\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial x} + \rho g_x \\ \rho \left(\frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) &= \mu \left[\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial y} + \rho g_y \\ \rho \left(\frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) &= \mu \left[\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right] - \frac{\partial P}{\partial z} + \rho g_z \end{aligned}$$

Figura 2.5. Equacions de Navier-Stokes. [1]

Ja tenim determinat el nostre fluid, sabent les velocitats, que treballa com un fluid subsònic, incompressible i viscos.

Fluid laminar i turbulent.

Com ja hem explicat anteriorment, el perfil està sotmès a una capa límit i aquesta pot ser laminar o turbulenta o una mescla de les dues configuracions.

Un flux laminar es mou de forma contínua, ordenada i en línies paral·leles, en canvi el moviment de les partícules en flux turbulent es aleatori i es formen remolins com podem observar a la figura 2.6.



Figura 2.6. Esquema representatiu del flux laminar i turbulent. [24]

Per determinar si és laminar o turbulent, calculem el nombre de Reynolds;

$$Re = \frac{v_0 * c}{\nu}$$

On v_0 és la velocitat del fluid en ($\frac{m}{s}$), c és la longitud característica (m), en el nostre cas és la corda de l'aleró i la ν és la viscositat cinemàtica de l'aire (m^2/s).

3. L'AERODINÀMICA APLICADA A L'AUTOMOCIÓ

En aquest apartat hem utilitzat la bibliografia [9], [11], [21], [22], [24]

3.1. Història de l'aerodinàmica en la competició

L'aerodinàmica ha recorregut un llarg camí durant els últims anys. La primera intenció de muntar un aleró en un automòbil de competició es considera que va ser Michael May, un enginyer suís, en un Porsche Spyder en el any 1956. Aquest vehicle tenia un aleró just damunt el "cockpit" que es podia inclinar entre -3° i $+17^{\circ}$. Finalment el monoplaça no va arribar a córrer mai ja que els comissaris tècnics de Monza i Nürburgring, on feia comptes competir, no ho varen deixar.

Els enginyers havien estat treballant en millores que suposaven la implementació d'un aleró en els automòbils i poc després es varen començar a veure en turismes i automòbils d'alta gama a reu del món. Ja que es va descobrir que la velocitat punta era inferior degut a l'increment de resistència a l'avanç, els temps per volta en circuit de competició es veien cada vegada més augmentats. Varen concloure que la velocitat de pas per corba anava augmentant i aquest fet tan sols era possible per l'increment d'adherència del vehicle amb el sòl.

Doncs, així com va dir Jim Hall, un enginyer i pilot, que les ales mantenien els avions a l'aire mitjançant una força de sustentació positiva que creaven les mateixes ales, i al menys tan gran com el propi pes de l'aeronau, es va demanar perquè no podien implementar el mateix sistema però invertit en els seus automòbils de competició, per poder augmentar l'adherència. I així ho va fer, va aparèixer a Bridgehampton el 1966 amb alerons muntats al seu Chaparral 2E figura 3.1. És Hall qui és conegut mundialment per haver estat el primer en córrer amb un automòbil amb alerons muntats.



Figura 3.1. El Chaparral 2E, el primer automòbil de competició amb alerons. [21]

A partir d'aquest moment, tots els enginyers relacionats amb la competició dels automòbils varen veure una porta oberta a un món totalment nou, on podien obtenir grans millores amb la utilització dels alerons. En els anys 70 es va estendre el desenvolupament dels alerons en els monoplaques i en turismes d'alta gama.



Figura 3.2. Formula 1 dels anys 70. [22]

A Europa, estava en vigor el grup 2, els automòbils dels quals tenien grans entrades d'aire amb difusors de flux en la part frontal i uns grans alerons en la part posterior. Seguidament, la Formula 1, la Formula 3000 (que era la que va reemplaçar la formula 2 a principis dels anys 80) i la Formula 3 varen tenir que cercar altres mètodes per recuperar l'adherència per culpa dels canvis dels reglaments. Varen deixar de fer cotxes tan espectaculars aerodinàmicament per passar a la utilització del monoplaques amb motors de 1.5 litres i incrementant-los la seva potència. Va ser quan varen optar per la utilització dels turbocompressors. Ja que aquest nous monoplaques superaven els 1000 cavalls de potència varen tenir que centrar tota la càrrega aerodinàmica que s'aconseguia per poder transmetre aquesta potència desmesurada amb el terra.

Per altra banda, les categories amb monoplaques menys potents varen haver d'optimitzar i cercar un equilibri entre la resistència a l'avanç i l'increment d'adherència. Aquests dissenys ja no eren tan sobredimensionats com els d'un Formula 1.



Figura 3.3. Formula 1 dels anys 80. [22]

En respecte als automòbils de tipus turisme, les millores varen continuar amb la incrementació de l'efecte sòl i un gran desenvolupament dels difusors. També es varen estudiar els alerons més a fons i varen començar a sorgir formes més complexes utilitzant les tres dimensions per un millor control del flux de l'aire. De mica en mica, es varen incrementar nous sistemes aerodinàmics que afectaven menys a la resistència.

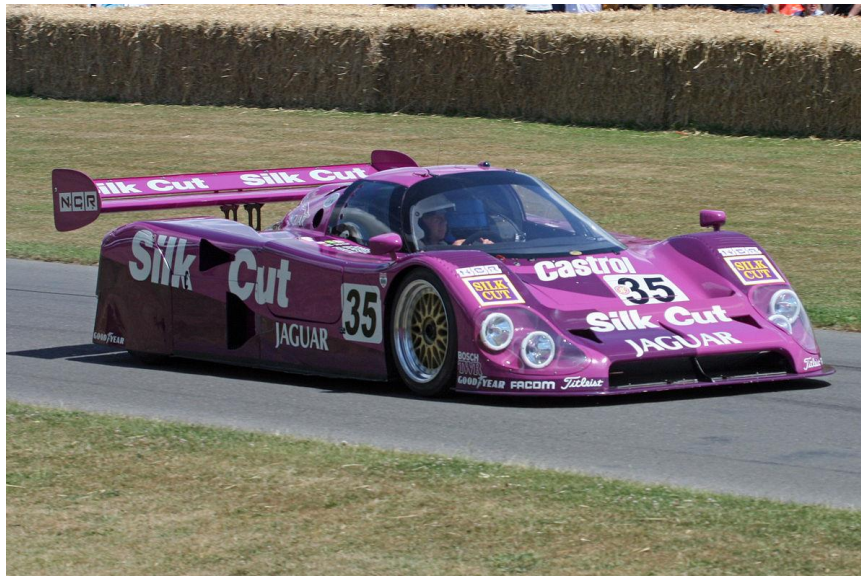


Figura 3.4. Jaguar XJR 12. [22]

En la figura 3.4 trobem un Jaguar XJR 12 prototipus on podem observar la importància de les modificacions i increment de càrrega aerodinàmica del automòbil sport.

Després del tràgic cap de setmana de Imola de 1994, a on Roland Ratzenberger i Ayrton Senna varen perdre la vida en dos accidents diferents, la federació internacional de automobilisme va realitzar alguns canvis per reduir la càrrega aerodinàmica de manera significativa. A l'any 1995 es va introduir una regla que també va ser aplicada als Formula 3000 i Formula 3, que era limitar l'espai mínim entre els fons de l'automòbil i el terra. Aquestes normes varen ser aplicades per millorar la sensibilitat en els monoplaques als canvis bruscs de altura i per tant es varen fer més bons de pilotar.

Per acabar, els alerons aplicats en competició s'han convertit en un element que serveix per guanyar una disminució del temps per volta però també amb un element de seguretat necessari per optimitzar una conducció més segura.

3.2. Components aerodinàmics destacats

Per poder profunditzar en la millora de l'aerodinàmica del monoplaça cal tenir en compte tots els elements que tenim en el nostre monoplaça per poder-los estudiar individualment i detingudament, i així poder obtenir una millora notable amb el comportament del vehicle. Aquest fet, com ja hem estat explicant al llarg del projecte, és incrementar la càrrega aerodinàmica i disminuir la resistència a l'avanç.

Ens trobem en què en molts de casos, la millora de la càrrega aerodinàmica es contraposa amb la disminució de la resistència a l'avanç, per això tindrem que arribar en un punt entremig que ens doni per bo tant una cosa com l'altre.

3.2.1. Alerons

El component del monoplaça amb el qual treballarem més i sens dubte el més important és l'aleró. Els alerons són l'element fonamental a l'àmbit de l'aerodinàmica. Històricament també va ser el primer element en el qual es va treballar i en qualsevol cas, és el primer element que pensem quan parlem d'aerodinàmica.

En el món de l'automoció, l'aleró és una "copia" de les ales d'avions però invertides en el seu funcionament. Es crea una zona de baixes pressions en la part inferior creant un efecte de força de succió contra el terra que és la càrrega aerodinàmica.

En un monoplaça podem distingir-hi dos alerons, un aleró davanter, com diu el nom, situat a la part davantera del monoplaça i un en la part posterior del monoplaça. Normalment aquests dos alerons tenen configuracions diferents. Entenem per configuracions com els diferents angles d'atac que puguin assolir, la inclinació general del mateix, o fins i tot el material de cada un d'ells.

3.2.1.1. Aleró davanter

L'aleró davanter, a més de tenir la funció de càrrega aerodinàmica, també està dissenyat per canalitzar el flux incident cap a les zones on es pugui aprofitar per augmentar la càrrega aerodinàmica o, fins i tot, canalitzar el flux sobrant de manera que no interactuï amb la resta de flux.

Majoritàriament la seva forma és allargada i va des de la part exterior d'una roda fins l'altra.



Figura 3.5: Monoplaça a estudiar. [Autor]

En la figura 3.5 podem observar que l'aleró davanter arriba fins a la meitat de les rodes, una possible millora podria ser incrementar la longitud per poder redirigir el flux per sobre de les rodes.

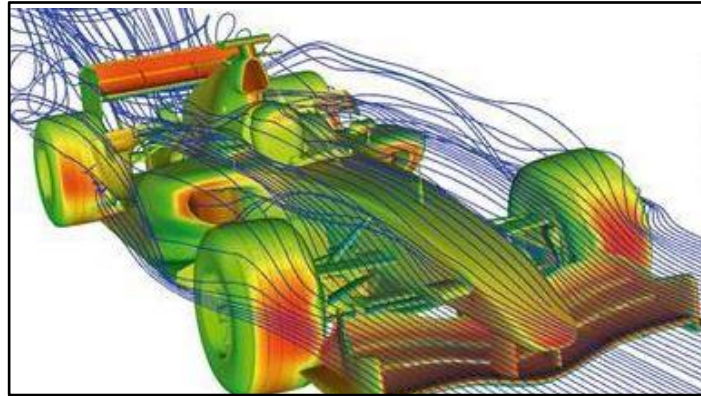


Figura 3.6: Monoplaça de la Formula 1, estudiat en CFD. [24]

Com veiem a la figura 3.6, una part del flux incideix directament a les rodes sense crear càrrega aerodinàmica.

3.2.1.2. Aleró posterior

Si ens centrem amb els monoplaques de competició, l'aleró posterior és l'element més influent amb la generació de càrrega aerodinàmica, però també és el punt on més turbulències es generen. Normalment, com podem veure en la figura 3.7 els alerons posteriors es divideixen en dos perfils per disminuir les turbulències fent que la capa límit laminar es mantingui el màxim de recorregut als perfils.

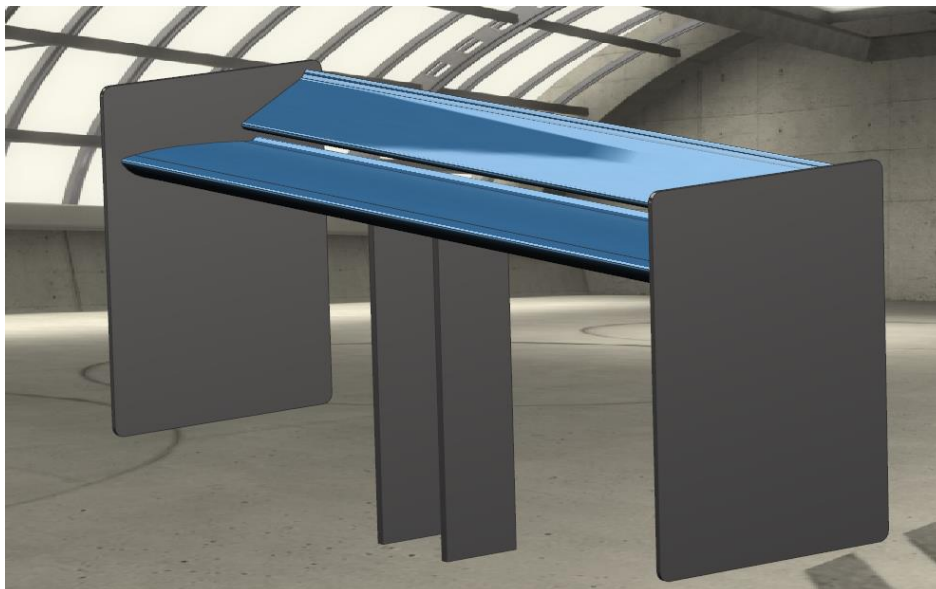


Figura 3.7. Aleró posterior Formula Renault Mygale 1996. [Autor]

La configuració de l'aleró posterior és un dels punts més importants per la creació de càrrega aerodinàmica i serà necessària per ajustar el monoplaça a cada circuit, ja bé sigui un circuit que predominin les rectes de gran velocitat o un circuit de moltes corbes.

Les configuracions de l'aleró posterior per un circuit amb que predomini la velocitat punta serà una configuració amb el mínim grau d'angle d'atac en canvi per un circuit predominant de corbes la millor configuració seria amb angles d'atac pronunciats i amb elements que aportin molta càrrega aerodinàmica.

Actualment en la Fórmula 1, es troba implementat el sistema DRS que té la funció de variar l'angle d'atac del perfil superior de l'aleró posterior des de la posició màxima a la mínima per maximitzar l'eficiència en un avançament en recta.

3.2.1.2.1. Sistema "DRS"

En aquest apartat hem utilitzat la bibliografia [12], [14], [25]

Com antes hem mencionat, el sistema "DRS" és l'aparell encarregat de variar la inclinació o l'angle d'atac de l'aleró posterior i es va dissenyar principalment per anular la càrrega aerodinàmica.

El sistema, activat directament per el pilot, actua sobre un del dos perfils convertint-lo en mòbil. S'usa quan el monoplaça es troba en una recta i aquest perfil s'obri per així deixar passar l'aire i per conseqüència deixant de generar càrrega aerodinàmica com podem veure en les figura 3.8 i 3.9

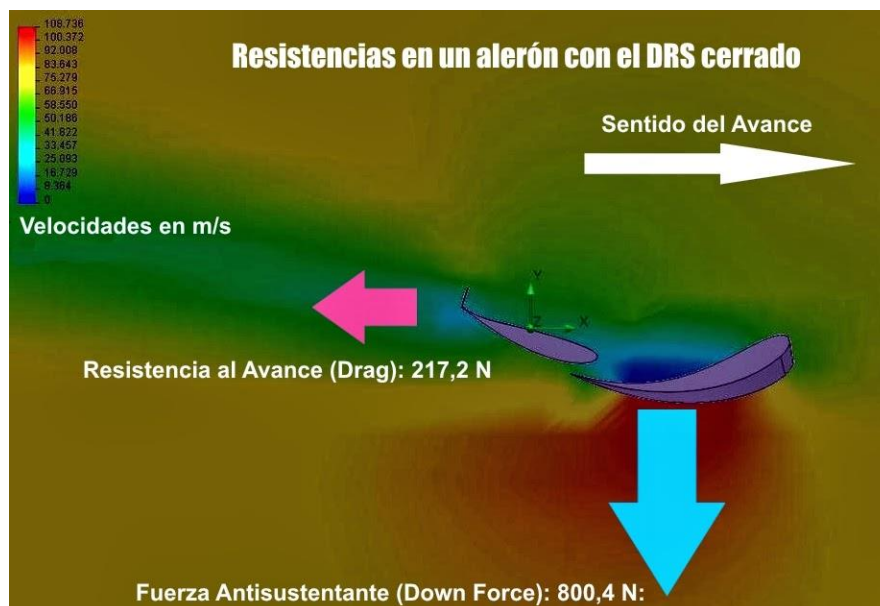


Figura 3.8. Representació de les resistències en un aleró amb el DRS tancat. [25]



Figura 3.9. Representació de les resistències en un aleró amb el DRS obert. [25]

Actualment hi ha diferents tipus de funcionament o accionament del sistema;

- Mecanisme “Push up”

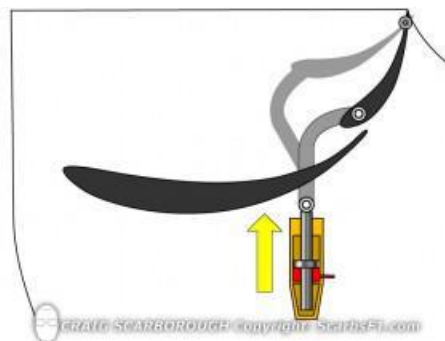


Figura 3.10. Esquema del mecanisme “Push up”[14]

Aprofita el suport estructural central de l'aleró posterior dels monoplaques de la Formula 1 per introduir un pistó hidràulic per realitzar el moviment.

- Mecanisme “Pods & Rockers”

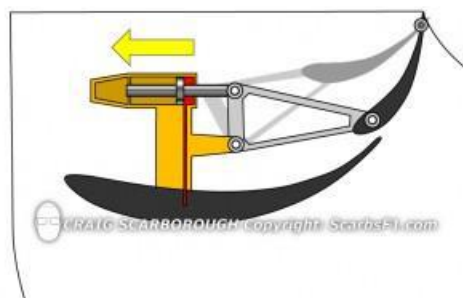


Figura 3.11. Esquema del mecanisme “Pods % Rockers” [14]

En aquest mecanisme el disseny aerodinàmic està més elaborat i el pistó hidràulic es col·loca horitzontalment. Amb aquesta configuració l'actuació del sistema és més ràpida.

- Mecanisme "Pod Pull"

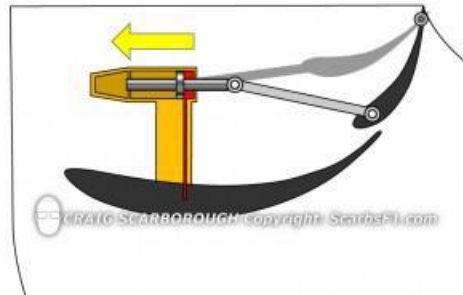


Figura 3.12. Esquema del mecanisme "Pod Pull" [14]

El sistema "Pod pull" és un mecanisme molt similar al "Pods & Rockers" però simplificant les parts que intervenen, millorant la seva aerodinàmica i fent més eficaç el seu moviment.

El que nosaltres utilitzarem és el que ens trobem en les figura 3.13 i 3.14 que està compost per quatre barres articulades donant com a resultat un mecanisme tradicional de manovella-biela-balanci. L'extrem superior del perfil superior es troba encollat amb un passador al perfil lateral i a partir del moviment d'un motor elèctric ens resulta el moviment amb els graus de l'angle d'atac que realitza el flap.

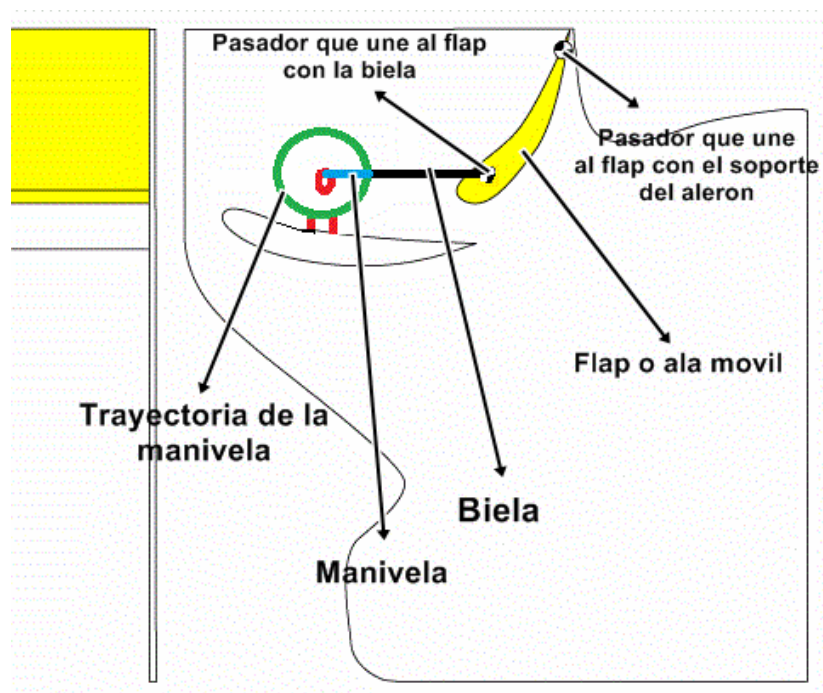


Figura 3.13. Sistema amb DRS desactivat. [25]

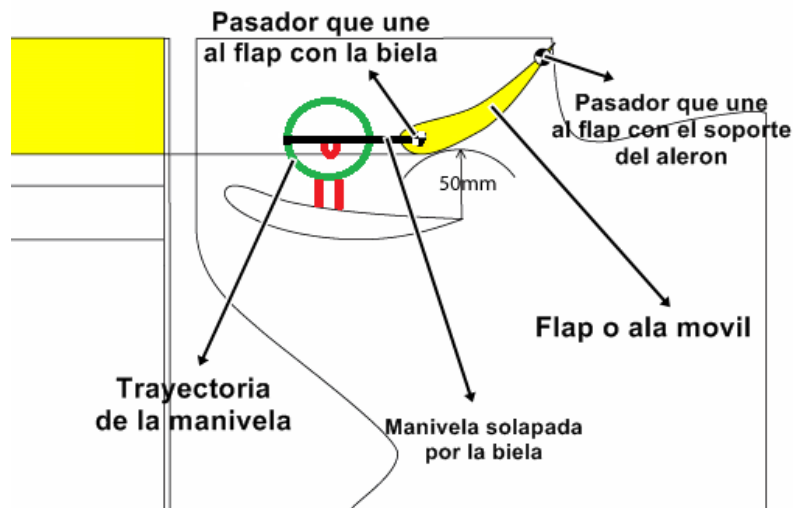


Figura 3.14. Sistema DRS activat. [25]

En circuits amb una velocitat mitjana-lenta es calcula un augment de velocitat entre 10 i 14 km/h quan s'activa el DRS. Mentre que en traçats ràpids s'estima una velocitat entre 4 i 6 km/h.

En resum, amb aquest sistema aconseguim anular part de la càrrega aerodinàmica en les rectes, i deixar generar la càrrega aerodinàmica en les corbes.

3.2.1.3. Alerons laterals

La nova tecnologia amb termes d'aerodinàmica utilitzada per els monoplaços són la implementació de alerons laterals o també denominats "Winglets" com podem veure en la figura 3.15.



Figura 3.15. Winglets en un Fórmula 1 Renault 2006. [15]

La seva funció principal és distribuir el flux de l'aire que passa per al voltant del monoplaça, sobretot els fluxos turbulents que passen per al costat de les rodes. També generen càrrega aerodinàmica, tot i que no és la seva funció principal.

3.2.2. Difusor i fons pla.

En un automòbil de competició, el difusor i els fons pla van lligats de la mà. El difusor està col·locat a la part final del fons pla i a la part posterior del monoplaça com podem veure en la figura 3.16. S'encarrega de redirigir i controlar el flux de sortida, tant l'aire incident com els gasos d'escapament.

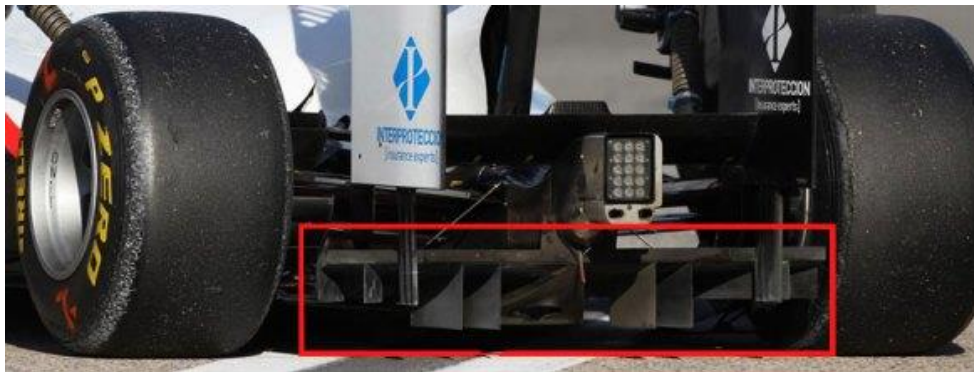


Figura 3.16. Difusor de un monoplaça de Formula 1. [16]

Per altre banda el fons pla és l'encarregat de generar càrrega aerodinàmica creant el factor conegut com "efecte sòl". El principal objectiu és aconseguir que l'aire passi el més ràpid possible, disminuint la pressió i generant succió del terra cap al monoplaça.

3.2.3. Deflectors

Els deflectors, al contrari de tots els altres elements aerodinàmics, no generen càrrega aerodinàmica i les seves funcions són dirigir el fluxos d'aire a les zones que es necessiti aquesta incidència com poden ser els elements de refrigeració del motor com veiem en la figura 3.17 o redirigir el flux cap als elements d'evacuació de l'aire com són els fons pla, incrementant el volum i velocitat d'aquest per ajudar a l'efecte sòl.



Figura 3.17. Deflector lateral d'un monoplaça de Fórmula 1. [16]

3.3. Tipologia de perfils

En aquest apartat hem utilitzat la bibliografia [6], [11], [26], [27], [28]

A continuació es presenta un esquema conceptual d'un perfil alar.

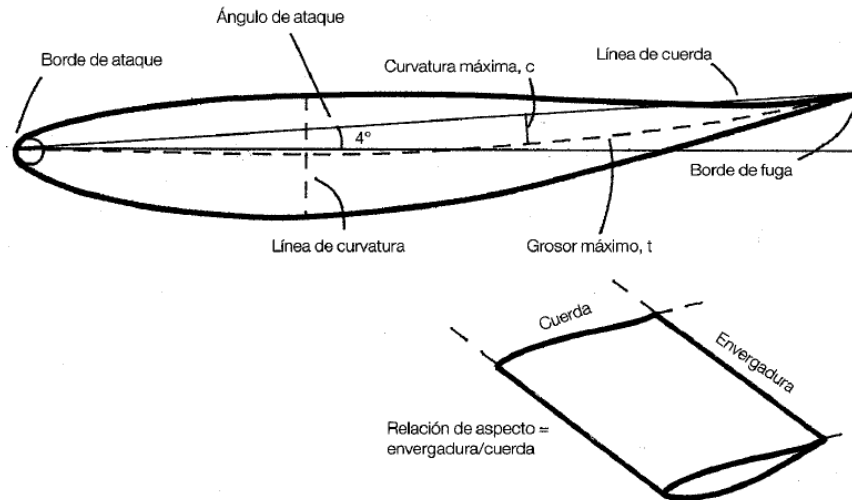


Figura 3.18. Esquema conceptual de perfils. [11]

Seguidament trobem una sèrie de nomenclatura relacionada amb els perfils i el seu significat. (figura 3.18)

- **Punta d'atac:** És la part davantera d'una ala i normalment té forma radial.
- **Corda:** És la línia recta que uneix la punta d'atac amb la punta de fuga que es troba al final del perfil. Es determina per la lletra "c".
- **Gruix:** És el gruix màxim d'un aleró i s'especifica amb la lletra "t". S'expressa com una fracció o percentatge de la dimensió de la corda.
- **Curvatura:** La secció d'una ala pot ser simètrica o antisimètrica. Si és antisimètrica es diu que té curvatura i això significa que la seva superfície inferior està més corbada que en la part superior.
- **Envergadura:** És l'amplada d'una ala i la seva relació entre l'envergadura i la corda és el que es coneix com a aspecte.
- **Angle d'atac:** És l'angle format entre la direcció del flux d'aire incident i la línia de la corda. Resulta que pensem que el flux d'aire incident en un monoplaça és horitzontal, paral·lel al terra, això no és del tot correcte, pot ser que en l'aleró davanter sí que passi, però quasi mai és cert en els alerons posteriors.
- **Centre de pressió:** És el punt teòric en el qual les forces que actuen sobre l'aleró i es crea un parell incident. A partir d'aquest punt sorgeix la distribució de pressions sobre tot l'aleró.

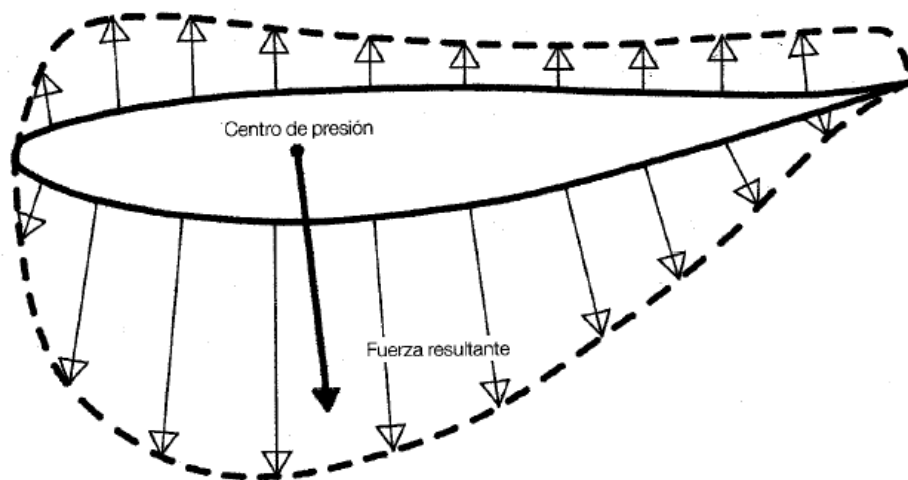


Figura 3.19. Distribució de forces sobre el perfil i el centre de pressió. [11]

Alerons d'un sol perfil alar.

Els principis per la creació de càrrega aerodinàmica és major quan l'angle d'atac és major fins el punt de l'angle límit. Un aleró d'un sol element no produeix càrrega aerodinàmica quan aquest angle és 0 però es va incrementant la càrrega gradualment mentre s'incrementa aquest angle d'incidència. Ens trobem que l'angle de pèrdua varia depenent del tipus de perfil i les condicions del flux.

Augmentar la curvatura d'un perfil alar permet generar més càrrega aerodinàmica inclús amb un angle d'atac de 0° . L'angle de sustentació nul·la és un angle significatiu. Atraçar la curvatura té un efecte major en la creació de càrrega i produeix un pèrdua més gradual que si la curvatura màxima s'incrementa.

El radi d'atac és un altre paràmetre en el que es pot trobar contradiccions. Es pot donar el cas de que un radi d'atac afilat produeix una disminució de càrrega a prop de l'angle de pèrdua. En contra, amb un angle de atac baix, també es pot donar el cas de que el radi de atac afilat ajudi a mantenir una capa límit més estreta sobre la primera part del perfil.

En conclusió, per un aleró d'un sol element, el paràmetres que influeixen són:

- Un baix angle d'atac aconsegueix poca càrrega aerodinàmica i poca resistència, un angle d'atac alt, produeix una major càrrega aerodinàmica i per conseqüència, major resistència.
- Petites quantitats de curvatura aconseguim poca càrrega aerodinàmica i una major curvatura una major càrrega.
- Radi de vora d'atac entre 1-3%.

Perfils aerodinàmics NACA

Els perfils NACA són una sèrie de perfils que varen ser creats per la NACA "National Advisory Committee for Aeronautics" que era l'agència estatunidenca encarregada d'estudiar i dissenyar els perfils per l'aviació. Aquests perfils es distingeixen per les seves característiques, poden ser;

- Sèries de quatre dígit
- Sèries de cinc dígit
- Modificats
- 1-series
- 6-series
- 7-series
- 8-series
- Sèries de quatre dígit.

El primer dígit descriu la curvatura màxima amb tant per cent de la corda, el segon dígit descriu la distància de màxima curvatura des de la vora d'atac en 0.1 del percentatge de la corda i els dos últims dígit són el gruix màxim com tant per cent de la corda.

Els perfils de sèries de quatre dígit tenen per defecte un valor màxim de gruix del 30% de la corda.

Exemple:

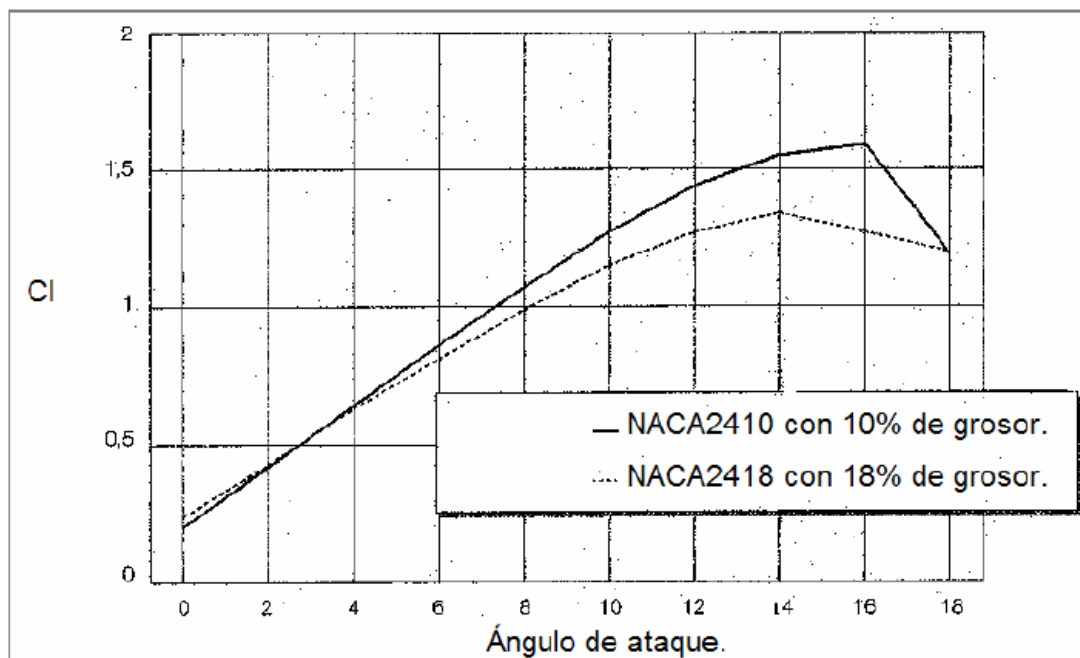


Figura 3.20. Corbes característiques de un NACA 2410 i 2418. [11]

La NACA 2410 té una màxima curvatura del 2%, màxima curvatura localitzada al 40% de la vora d'atac i el màxim espessor és del 10% de la corda.

- Sèries de cinc dígit

En les sèries de cinc dígit, el primer dígit multiplicat per 0.15 ens dona el seu coeficient de sustentació (C_L), els dos dígit següents quan es divideixen per 2 donen la distància de màxima curvatura des de la vora d'atac en tant per cent de la corda.

Els dos darrers dígit ens donen la màxima curvatura del perfil en tant per cent de la corda.

- Modificats

Les sèries de quatre i cinc dígit es poden modificar mitjançant un codi de dos dígit predits per un guió. El primer dígit descriu la curvatura de la vora d'atac, sent 0 una vora afilada i 6 la mateixa que el perfil original. El segon dígit descriu la distància de màxim espessor des de la vora d'atac en 0.1 del tant per cent de la corda.

- 1-series

Aquest tipus de perfils venen determinats a partir de la derivació matemàtica de les característiques de sustentació que es volien aconseguir.

L'1 descriu la sèrie, el segon dígit descriu la distància en que es troba la zona de mínima pressió en 0.1 per cent de la corda. El tercer dígit descriu el coeficient de sustentació en 0.1, i els últims dos dígit descriuen el màxim gruix en 0.1 del tant per cent de la corda.

- 6-series

Aquesta sèrie és una millora de la 1-series amb el repte de maximitzar el flux laminar. Són el mateixos dígit de la 1-series però introdueix un tercer dígit en forma de subíndex en el segon dígit de la sèrie descrivint que la resistència es manté baixa tantes dècimes per davall i per amunt del coeficient de sustentació especificat en el quart dígit. També introdueix "a=a un valor decimal" al final que descriu la fracció de la corda sobre la que el flux laminar es manté.

Exemple:

NACA 61₂-345 a=0.5

Zona de mínima pressió en el 10% de la corda, manté baixa residència 0.2 per sota i per sobre del coeficient de sustentació, té un màxim espessor en el 45% de la corda i es manté el flux laminar sobre el 50% de la corda.

- 7, 8 –series

En les series 7 i 8 es maximitza el flux laminar mitjançant la identificació de les zones de baixa pressió. El primer dígit ens indica la sèrie, el segon descriu la distància de pressió mínima en l'extradós en 0.1 del tant per cent de la corda, el tercer dígit descriu la pressió mínima en la part intradós en 0.1 del tant per cent de la corda.



Figura 3.21. Exemple d'un aleró d'un sol perfil. Audi R8 Audi Sport. [26]

Alerons amb més d'un perfil.

Quan és necessari un increment extra de càrrega aerodinàmica i l'aleró d'un sol perfil no ens és suficient, podem optar per la utilització d'un doble aleró compostat per un aleró general amb un aleró més petit tipus "flap". Partint de l'equació bàsica de l'aerodinàmica;

$$F_L = \frac{1}{2} * \rho * A * C_L * V^2$$

Podem observar que deixant el paràmetre de la velocitat constant o a qualsevol valor de velocitat, si augmentem l'àrea de la planta de l'aleró (A) o el Coeficient de sustentació (C_L), estem incrementant la força aerodinàmica (F_L).

Normalment, en cada competició el reglament particular defineix les mesures màximes dels alerons i els enginyers es veuen obligats a optimitzar al màxim els alerons dins els rangs d'aquestes mesures.

Una altra manera d'augmentar la càrrega aerodinàmica podria ser mantenint una relació entre la corda i l'envergadura però intentar augmentar el C_L , això es pot aconseguir amb un aleró d'un sol element amb una major curvatura, o si es requereix més càrrega, també es pot aconseguir amb un aleró de diversos elements com el de la figura 3.22.

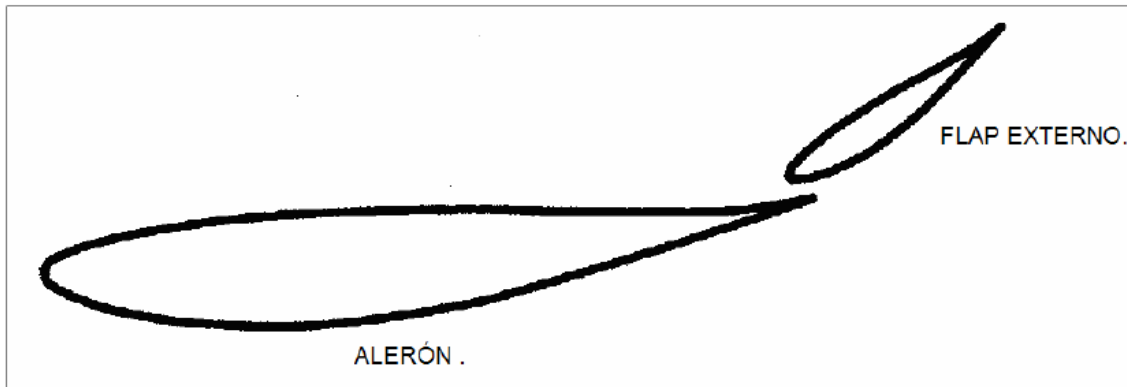


Figura 3.22. Configuració d'un aleró de dos elements amb flap extern. [11]

Avui en dia, existeixen dues formes generals d'alerons amb configuració de dos elements, aquests poden ser amb flap extern com el de la figura 3.22 o amb flap de ranura com el de la figura 3.24. La configuració de la figura 3.22 és la que està utilitzant actualment el Fórmula que estem estudiant en el seu aleró posterior Figura 3.23.



Figura 3.23. Aleró posterior del monoplaça a estudiar amb configuració amb flap extern. [Autor]

El flap de ranura és una còpia de les aplicacions aeronàutiques. La forma es basa en què en què l'aleró principal té una ranura en la qual el "flap" entra per disminuir la resistència i així el "flap" pot quedar quasi totalment horitzontal.

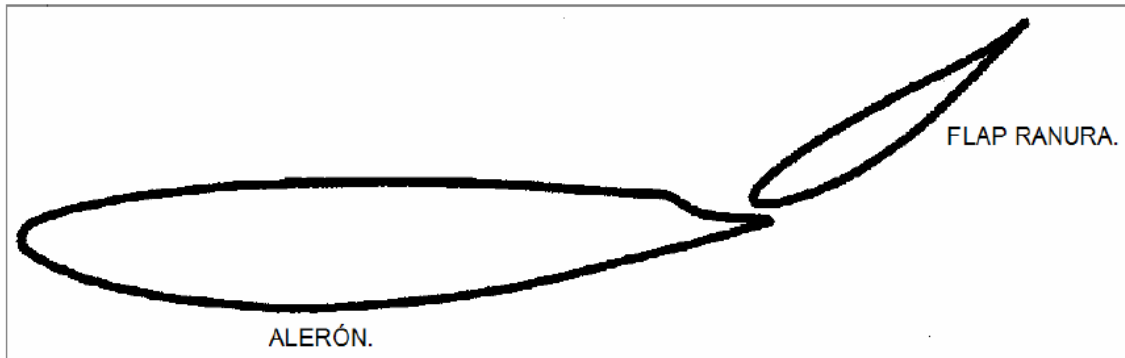


Figura 3.24. Configuració d'un aleró de dos elements amb flap de ranura. [11]

Aquesta segona configuració d'aleró, Figura 3.24, és la més adient per una implementació d'un sistema "DRS" ja que ens permet que quan el sistema DRS estigui activat, el flap per ranura estigui el més horitzontal possible per disminuir la resistència a l'avanç i actuaria simulant un aleró d'un sol element.

Aquesta nova configuració ens permet obtenir, durant la cursa, diferents estats entre resistència a l'avanç i càrrega aerodinàmica. Estudiant el sistema es podrien determinar segons les velocitats de flux quines posicions i angles d'atac de cada element de l'aleró serien òptimes per aconseguir una bona càrrega aerodinàmica y una resistència moderada, sense deixar de banda la manejabilitat i seguretat en la conducció del monoplaça.

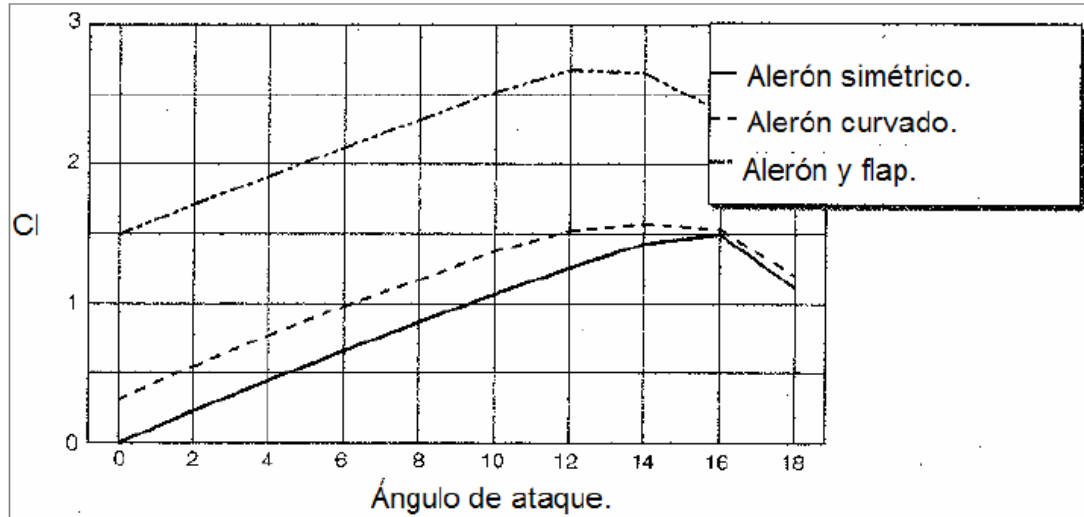


Figura 3.25. Corbes característiques de alerons en diferents configuracions. [11]

Com podem veure en la gràfica de les corbes característiques dels diferents tipus d'alerons (Figura 3.25), observem que tenim un notable augment del coeficient de sustentació C_L si a l'aleró incloem un flap.

A més, en els alerons se li adjunten en cada extrem unes plaques planes paral·leles entre si que eliminen els vòrtex creats pel flux incident. Aquestes tenen la funció de dirigir l'aire a través de l'aleró i que aquest no interfereixi entre si.

Un vòrtex és un flux turbulent rotatori que es genera en les puntes de les ales dels avions o dels alerons i no és desitjable de cara a l'estudi aerodinàmic.



Figura 3.26. Exemple d'un vòrtex generat en les ales d'un avió. [27]

A part del les plaques planes en els alerons, també hi ha altres sistemes que serveixen per variar els vòrtexs generats pel pas del flux de l'aire a través d'un turisme quotidià, figura 3.27.



Figura 3.27. Element aerodinàmic d'un vehicle quotidià. [28]

4. ESTUDI BIDIMENSIONAL

En aquest apartat hem utilitzat la bibliografia [13], [Annex 2]

4.1. Introducció al software XFLR5

El software XFLR5 és un software de llicència lliure creat per el modelatge i estudi dels perfils de l'aviació i que nosaltres utilitzarem per simular els perfils del alerons davanter i posterior del nostre fórmula. Ens servirà per poder obtenir els coeficients d'arrossegament i de sustentació dels perfils estudiats respecte el nombre de Reynolds, de l'angle d'atac i del nombre de Mach.

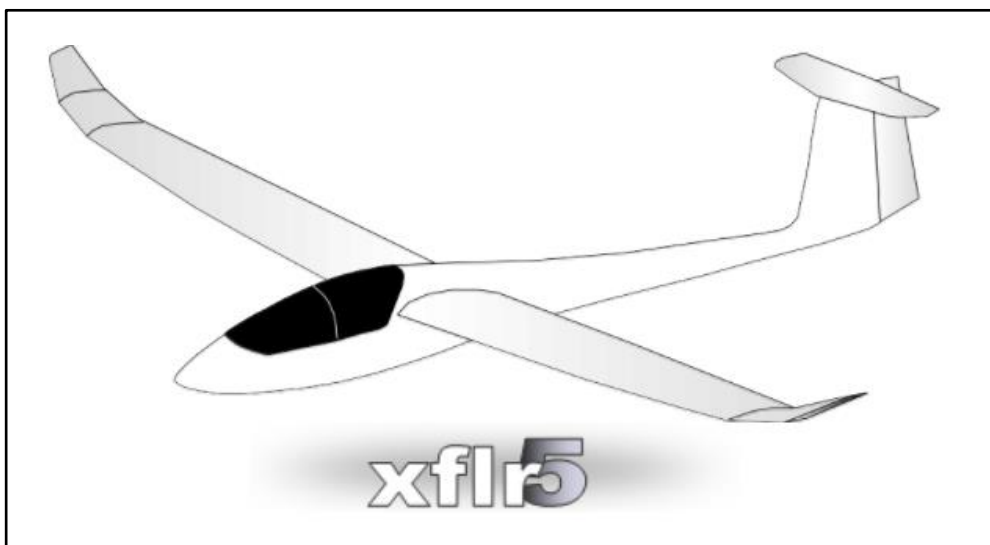


Figura 4.1. Caràtula del software XFLR5 [XFLR5]

Per usar el programa en primer lloc necessitem crear o bé assignar de la seva pròpia base de dades el perfil que volem estudiar. Si el que necessitem és crear-lo, el que haurem que fer és introduir les coordenades del perfil alar ja obtingudes anteriorment en el manual de monoplaça.

Un cop obtingut el perfil amb les coordenades correctes, passem a l'opció d'anàlisis. Aquí trobem diferents tipus d'anàlisis, tindrem que escollir un, depenent de les incògnites que tenim i el que necessitem cercar.

En el nostre cas, en l'opció d'anàlisis que realitzarem serà cercar els coeficients d'arrossegament i de sustentació a partir del valor de Reynolds, l'angle d'atac i el nombre de Mach.

En l'anàlisi de resultats del programa obtenim els coeficients de sustentació i d'arrossegament però aquests estan estudiats en dues dimensions, això implica que el valor que obtindrem de les forces aerodinàmiques ens vindran donades per unitat de longitud de l'envergadura.

$$F_d = \frac{1}{2} * \rho * v^2 * c * C_D$$

On F_d és la força aerodinàmica per unitat de longitud de l'envergadura (N/m), i c és la corda del perfil (m).

Per obtenir el valor real de les forces aerodinàmiques respecte a tot el perfil necessitem dividir la força obtinguda anteriorment per l'envergadura, quedant:

$$F_D = F_d * L$$

4.2. Models a estudiar

Encara que existeixen un gran nombre d'elements aerodinàmics en el monoplaça ens centrarem amb l'estudi dels alerons davanter i posterior i totes les parts que els formen.

4.2.1. Aleró davanter

Un cop obtingudes les mesures reals dels alerons del monoplaça procedim a dibuixar el model en 3D amb el software Siemens NX. Per poder realitzar el CAD a més de les mesures directes sobre el propi aleró, vam fer una recerca sobre el tipus de perfil utilitzats per aquets monoplaques i ens ajudem de les dades dels perfils dels alerons del tipus NACA.

Una vegada comparat les dades de les mesures reals dels alerons i les dades de les mesures dels perfils NACA ens trobem que el NACA 5615 és el més aproximat al perfil real que tenim de l'aleró davanter.

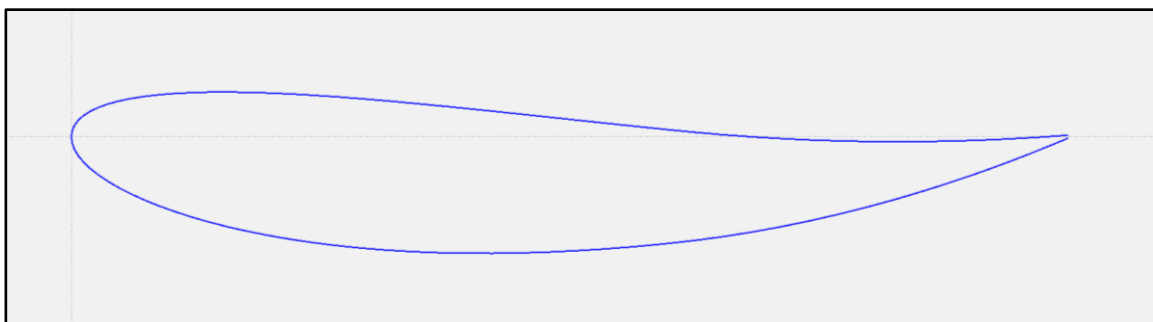


Figura 4.2. Secció del perfil de l'aleró davanter. [XFRL5]

Un cop obtingut el “datasheet” dels valors del perfil NACA 5615 (Annex 2), el processem en un full de càlcul i l'extrapolem al software Siemens NX (figura 4.2).

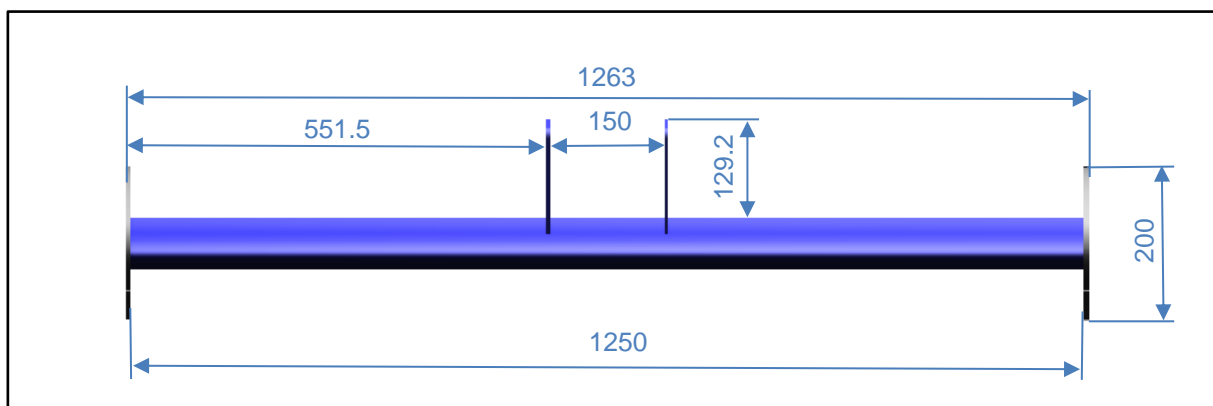


Figura 4.3. Croquis de l'aleró davanter amb cotes generals. [Autor]

Amb les dades unitàries (Taula 1 de l'Annex 2), podem aconseguir obtenir les dades reals del nostre perfil extrapolant la unitat a la mesura màxima que tenim que en el nostre cas és 280mm.

Així post-processem les dades i obtenim una nova taula que ens permet traspasar-la directament al programa Siemens NX per dibuixar el perfil de l'aleró.

Les dades teòriques del “datasheet” del perfil oscil·len entre -1 i 1, posant el cas que 1 = 280mm obtenim la nova taula. (Taula 2 de l'Annex 2)

Exemple del punt 10:

X	Y
$280 * 0,88385 = 247,478$	$280 * 0,04629 = 12,9612$

Un cop obtinguts els punts post-processats a partir del perfil NACA 5615 obtenim el perfil en Siemens NX. (figura 4.4 i 4.5).

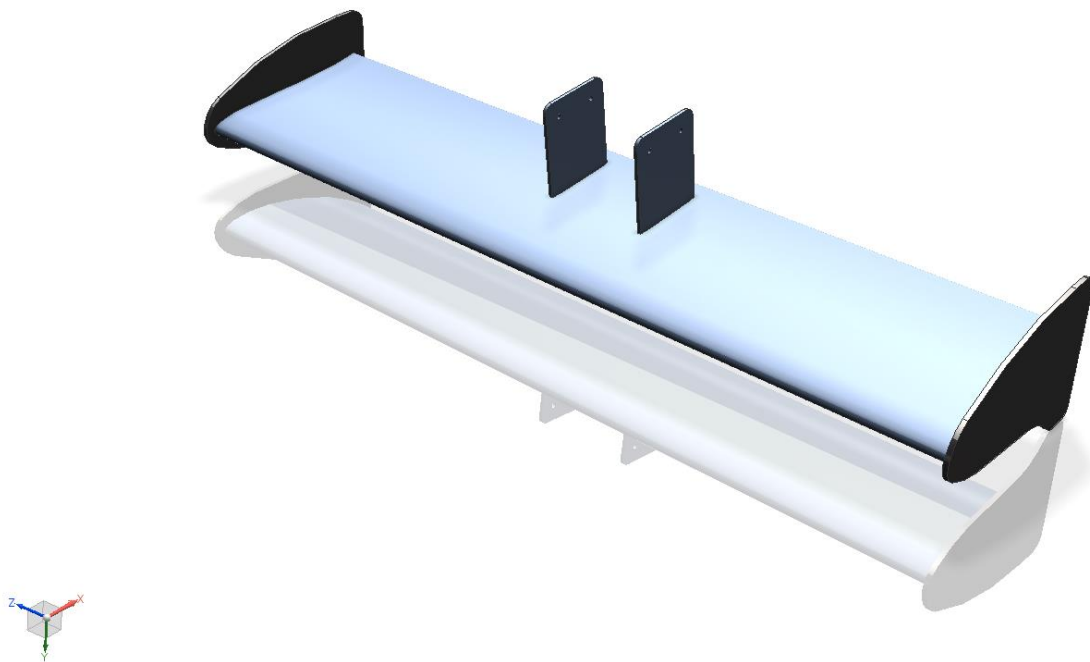


Figura 4.4. Vista frontal de l'assemblatge de l'aleró davanter. [Autor]

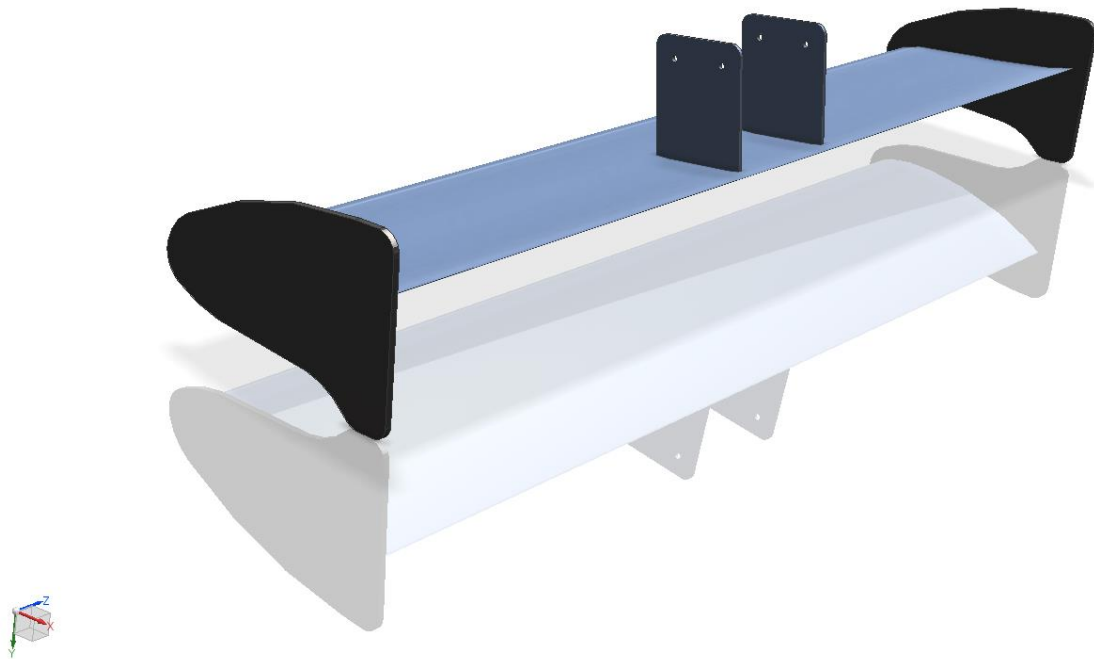


Figura 4.5. Vista posterior de l'assemblatge de l'aleró davanter. [Autor]

A més de modelar el perfil en Siemens NX, utilitzem el programari XFLR5 per obtenir els diferents diagrames polars entre el coeficient de sustentació (C_L) i el coeficient de arrossegament (C_D)

Per utilitzar el programa, primerament cal tenir clar les unitats utilitzades. Aquestes estaran en sistema internacional. (figura 4.6)

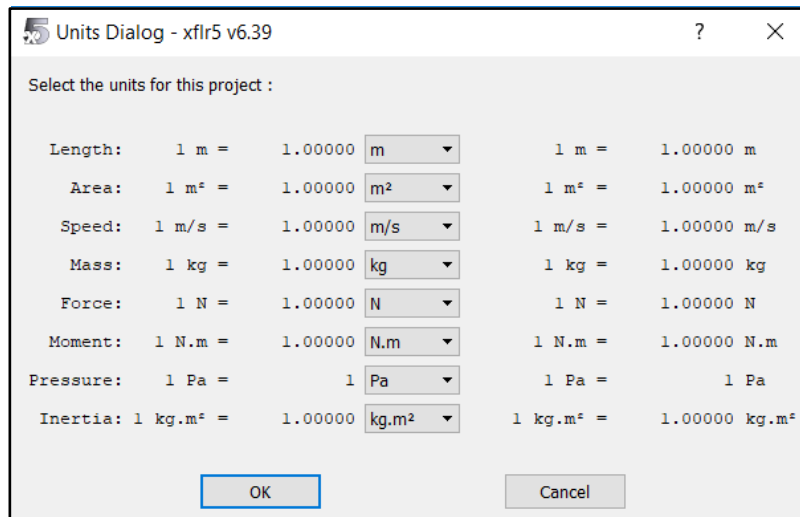


Figura 4.6. Selecció d'unitats bàsiques per l'execució del programa XFLR5.

Per a fer una petita estimació del rang del nombre de Reynolds en què es veurà afectat l'aleró hem realitzat la taula 4.3 amb les diferents velocitats a estudiar del monoplaça.

En l'aerodinàmica de l'automòbil, generalment per a Reynolds inferiors a 1.000.000 es considera règim laminar i per a superiors a aquest nombre es considera règim turbulent.

Taula 4.1. Taula resum del nombre de Reynolds i Mach segons la velocitat de l'aleró davanter.

c (m)	v (m²/s)	Velocitat (km/h)	Velocitat (m/s)	Reynolds	Mach
0,28	0,0000151	60,0	16,67	309050,77	0,049
		70,0	19,44	360559,23	0,057
		80,0	22,22	412067,70	0,065
		90,0	25,00	463576,16	0,073
		100,0	27,78	515084,62	0,082
		110,0	30,56	566593,08	0,090
		120,0	33,33	618101,55	0,098
		130,0	36,11	669610,01	0,106
		140,0	38,89	721118,47	0,114
		150,0	41,67	772626,93	0,122
		160,0	44,44	824135,39	0,131
		170,0	47,22	875643,86	0,139
		180,0	50,00	927152,32	0,147

Exemple de càlcul del nombre de Reynolds.

$$Re = \frac{v_0 * c}{\nu}$$

On v_0 és la velocitat del fluid en ($\frac{m}{s}$), c és la longitud característica (m), en el nostre cas és la corda de l'aleró i la ν és la viscositat cinemàtica ($\frac{m^2}{s}$) de l'aire a 15°C en aquest cas.

Apliquem dades;

- $c = 0.28m$
- $\nu = 1.51 * 10^{-5} \frac{m^2}{s}$
- $v_0 = 130 \frac{km}{h} * \frac{1000m}{1km} * \frac{1h}{3600s} = 36.11 \frac{m}{s}$

$$Re = \frac{36.11 * 0.28}{1.51 * 10^{-5}} = \boxed{669610}$$

Exemple de càlcul del nombre de Mach.

$$M = \frac{v}{v_s}$$

On v és la velocitat del fluid en ($\frac{m}{s}$) i la v_s és la velocitat del so ($\frac{m}{s}$) en l'atmosfera terrestre a 15°C en aquest cas.

Apliquem dades,

- $v = 130 \frac{km}{h} * \frac{1000m}{1km} * \frac{1h}{3600s} = 36.11 \frac{m}{s}$
- $v_s = 340.3 \frac{m}{s}$

$$M = \frac{36.11}{340.3} = \boxed{0.106}$$

El muntatge de l'aleró està en una disposició amb angle d'atac de 4°. Amb les dimensions de la NACA 5615 amb disposició a 4° podem obtenir les diferents gràfiques per els diferents nombres de Reynolds compresos entre 309.050 i 927.152 calculats anteriorment a la taula 4.1.

Seguidament exposem els resultats obtinguts a partir del programari, a una velocitat de 130km/h. Les característiques generals del perfil de l'aleró usat són les característiques de la NACA 5615 que observem a la taula 4.2.

Taula 4.2. Característiques del perfil alar de l'aleró davanter.

NACA 5615 v2	
Thickness	= 15.00%
Max. Thick.pos.	= 29.29%
Max. Camber	= 5.00%
Max. Camber pos.	= 59.60%
Number of Panels	= 99

A la figura 4.7 obtenim la representació gràfica de la distribució de pressions així com la resultant i el seu punt d'aplicació. També podem observar la capa límit representada en color vermell sobre el perfil.

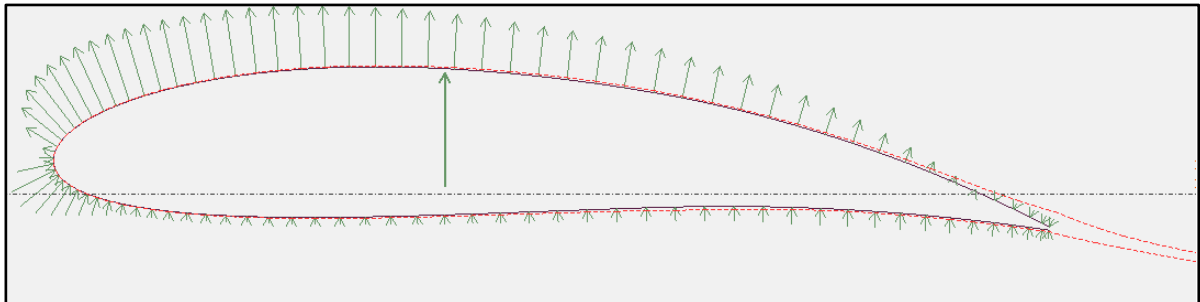


Figura 4.7. Esquema del perfil alar amb angle d'atac de 4º.[XFLR5]

La posició del punt d'aplicació de la força de sustentació resultant és; (0.394, 0.008) => (110.32, 2.24) mm

Exemple del càlcul de la força a velocitat mitjana de $130 \frac{Km}{h}$:

Apliquem;

$$F_D = C_D * \rho * c * L * \frac{v^2}{2}$$

On F_D és la càrrega aerodinàmica (N), ρ és la densitat ($\frac{Kg}{m^3}$), v és la velocitat ($\frac{m}{s}$), c és la longitud de la corda per perfil (m), L és la longitud de l'envergadura (m) i C_D és el coeficient de sustentació 2D (Ad.).

Dades:

- $C_D = 0.0087$
- $\rho = 1.204 \frac{Kg}{m^3}$
- $c = 0.28 m$
- $L = 1.25 m$
- $v = 36.11 \frac{m}{s}$

$$F_D = 0.0087 * 1.204 \frac{kg}{m^3} * 0.28 m * 1.25 m * \frac{(36.11 \frac{m}{s})^2}{2} = 2.39 N$$

Apliquem;

$$F_L = C_L * \rho * c * L * \frac{v^2}{2}$$

Dades:

- $C_L = 1.11$
- $\rho = 1.204 \frac{kg}{m^3}$
- $c = 0.28 m$
- $L = 1.25 m$
- $v = 36.11 \frac{m}{s}$

$$F_L = 1.11 * 1.204 \frac{kg}{m^3} * 0.28m * 1.25m * \frac{\left(36.11 \frac{m}{s}\right)^2}{2} = 304.96N$$

La velocitat mitjana del monoplaça en cursa és de 130km/h per aquest fet ens centrem en aquesta velocitat.

Taula 4.3. Resum de resultats de l'aleró davanter amb angle d'atac de 4°

Velocitat (km/h)	Mach	Reynolds	C _L /C _D	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)
60,0	0,049	309050,77	102,77	1,094	0,011	64,03	0,64
70,0	0,057	360559,23	112,15	1,104	0,0098	87,95	0,78
80,0	0,065	412067,70	116,05	1,105	0,0095	114,97	0,99
90,0	0,073	463576,16	119,08	1,1055	0,0093	145,58	1,22
100,0	0,082	515084,62	121,26	1,106	0,009	179,81	1,46
110,0	0,090	566593,08	122,79	1,107	0,0089	217,77	1,75
120,0	0,098	618101,55	123,61	1,11	0,0088	259,86	2,06
130,0	0,106	669610,01	124,43	1,11	0,0087	304,98	2,39
140,0	0,114	721118,47	125,59	1,111	0,0086	354,02	2,74
150,0	0,122	772626,93	125,40	1,114	0,0085	407,50	3,11
160,0	0,131	824135,39	126,52	1,115	0,0084	464,06	3,50
170,0	0,139	875643,86	127,58	1,116	0,0083	524,35	3,90
180,0	0,147	927152,32	127,68	1,117	0,008	588,38	4,21

Un cop obtinguda la taula de resultats (Taula 4.3), amb els coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç respecte les velocitats podem determinar la tendència d'aquests coeficients així com veiem en la figura 4.8 i 4.9.

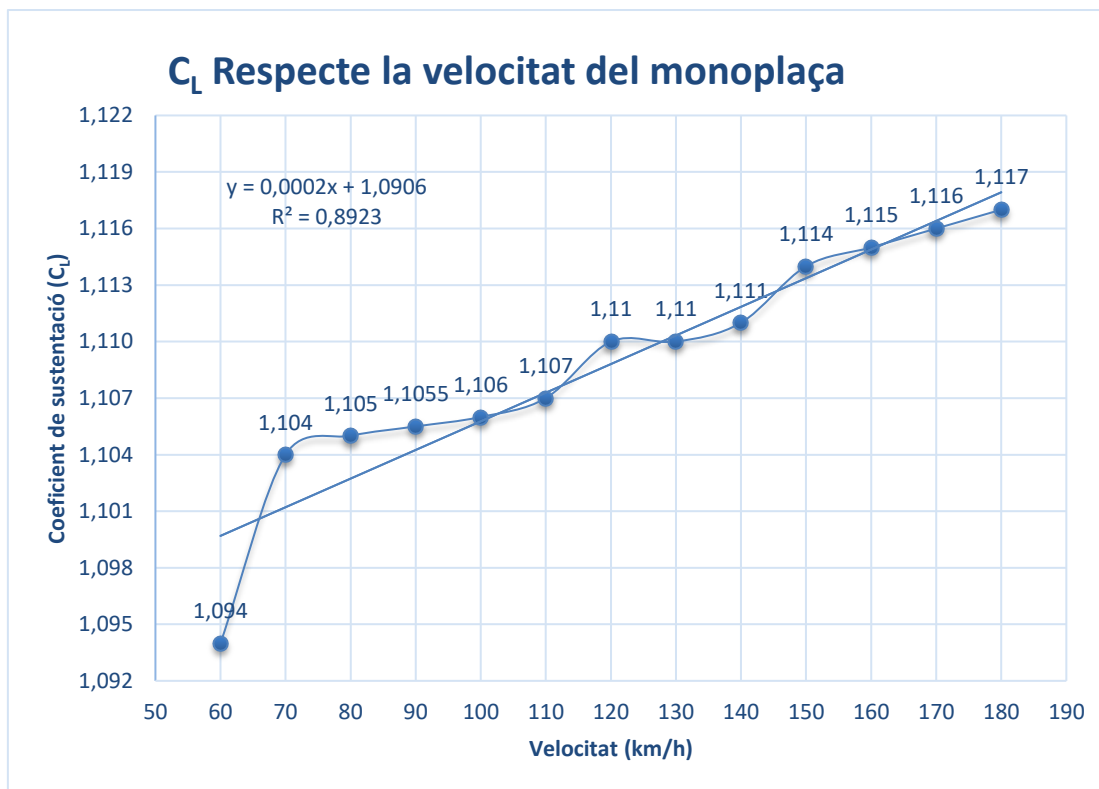


Figura 4.8. Tendència del coeficient d'anti-sustentació bidimensional (C_L) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

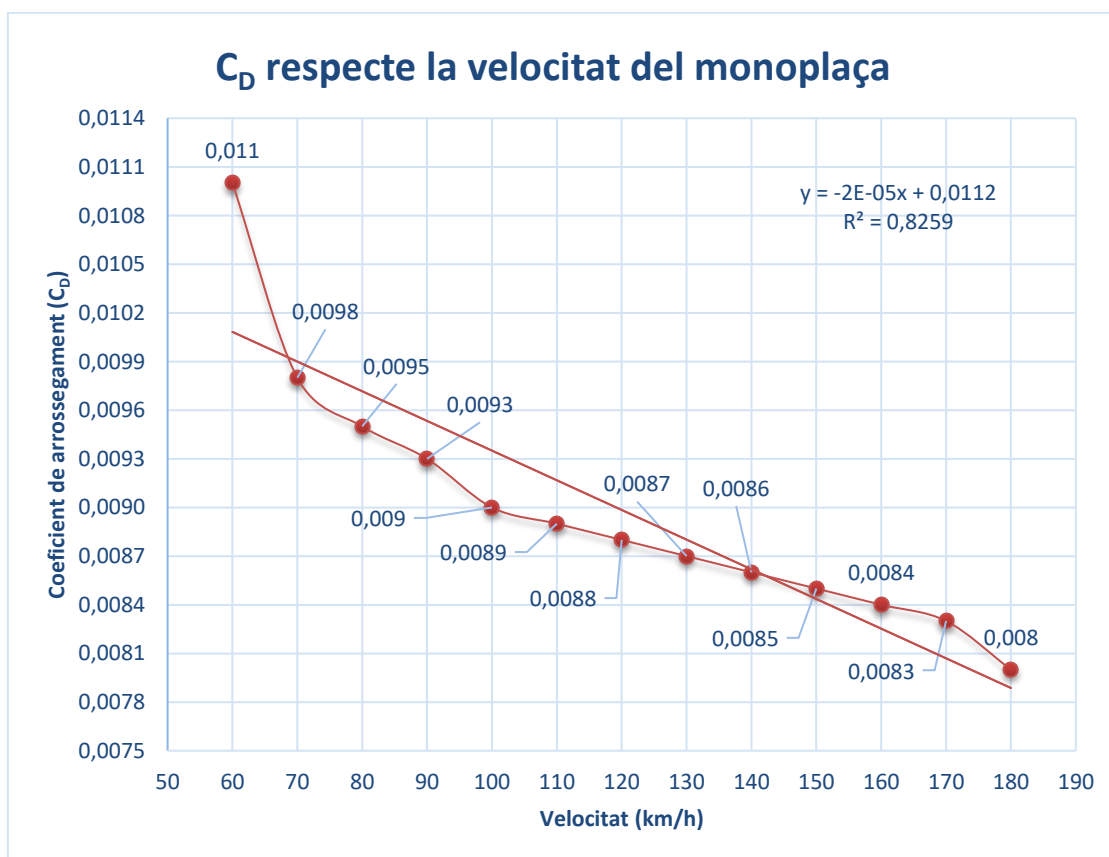


Figura 4.9. Tendència del coeficient d'arrossegament bidimensional (C_D) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

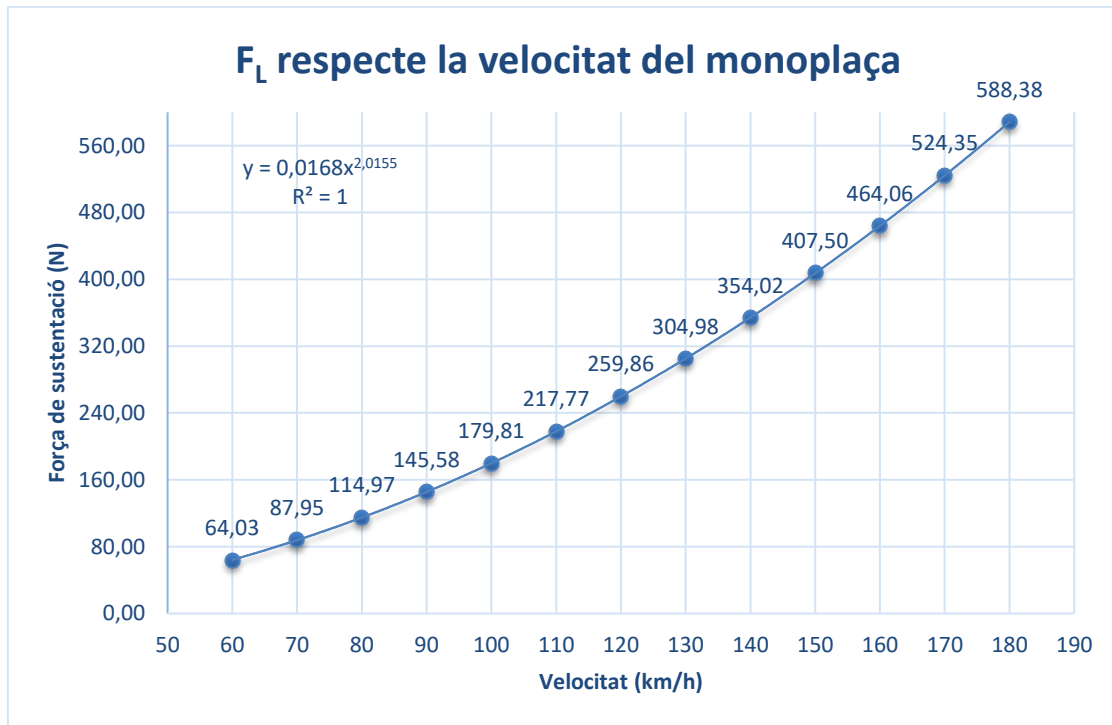


Figura 4.10. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

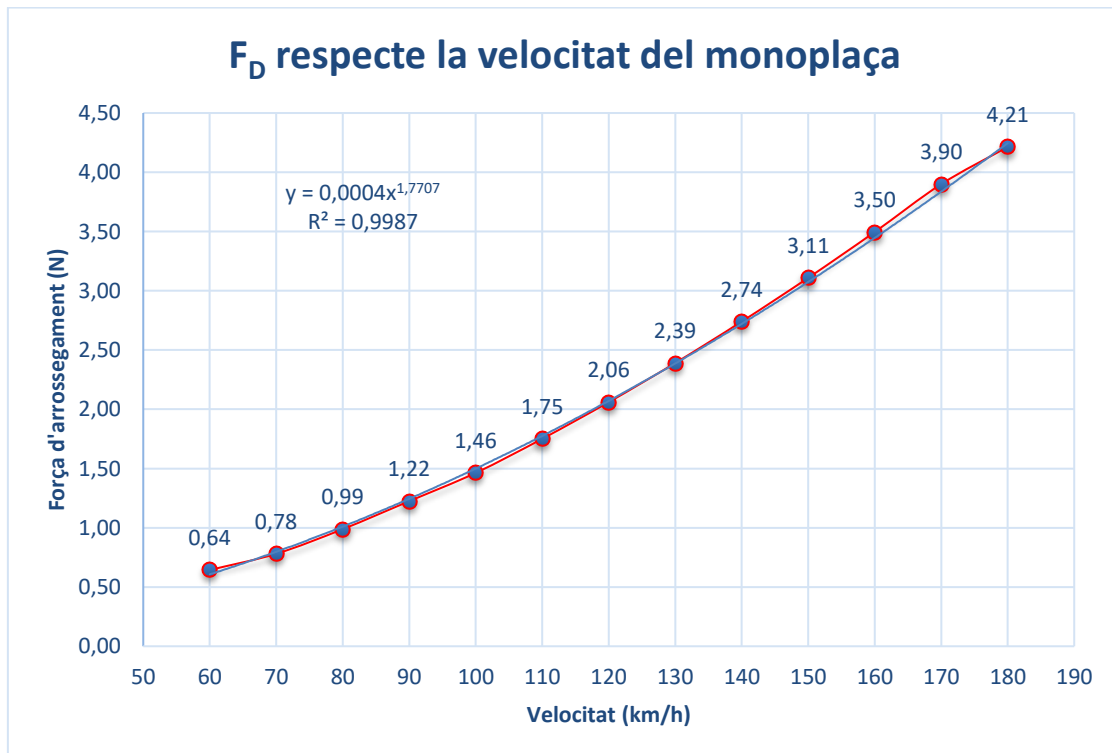


Figura 4.11. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

Observem a simple vista que la diferència entre els valors de les forces de sustentació i d'arrossegament són grans.

Per altre banda, en el nostre primer cas, per un angle d'atac de 4° obtenim una força d'arrossegament baixa màxima de 4.21 N en proporció a la força d'anti-sustentació màxima de 588.38 N.

4.2.2. Aleró posterior

Un cop estudiat l'aleró davanter, ens centrem en modelar l'aleró posterior amb tots els seus components. Per obtenir els valors originals dels perfils posteriors recorrem al manual d'usuari del monoplaça Renault Mygale 96.

Secció nº1 de l'aleró posterior

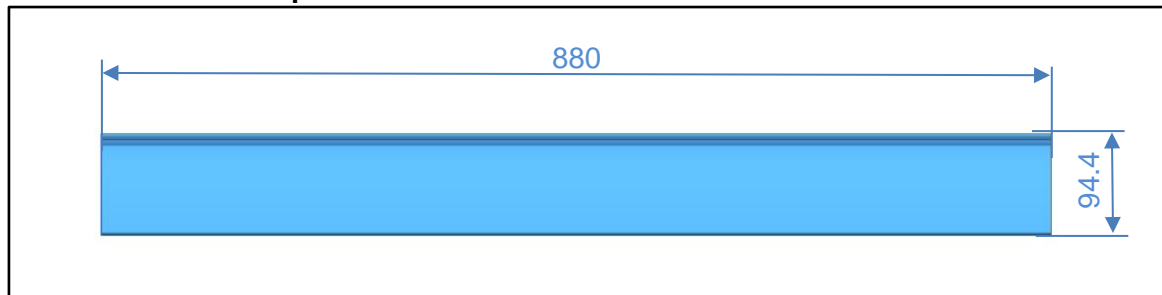


Figura 4.12. Croquis de la secció 1 de l'aleró posterior. [Autor]

A partir dels valors originals del perfil de l'aleró (taula 4.3 de l'Annex 2), modelem i obtenim el perfil que podem observar en la figura 4.13.

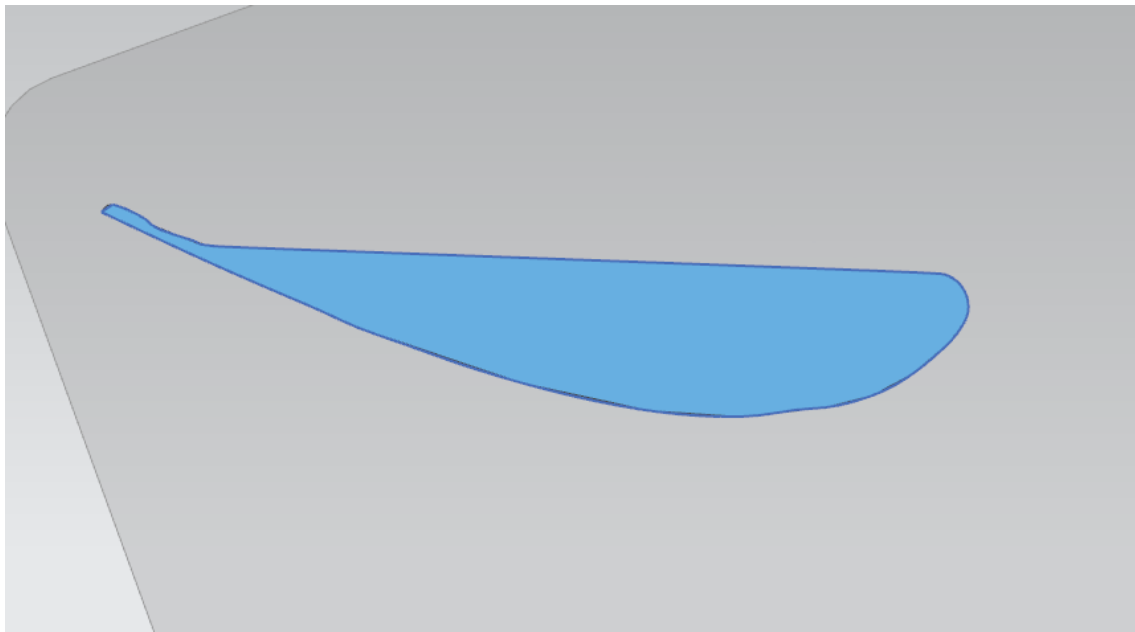


Figura 4.13. Secció nº1 del perfil posterior. [Autor]

Quan tenim el primer perfil de l'aleró modelat necessitem fer el càlcul del rang del nombre de Reynolds i Mach en que es veurà afectat l'aleró i calcular les forces aerodinàmiques.

Seguidament exposem els resultats obtinguts a partir del programari XFLR5, a una velocitat de 130km/h. Les característiques generals del perfil de l'aleró usat són les característiques de la secció 1 que observem a la Taula 4.4.

Taula 4.4. Característiques de la secció 1 del perfil de l'aleró posterior.

Seccio 1 aleró posterior	
Thickness	= 17.66%
Max. Thick.pos.	= 29.09%
Max. Camber	= -8.03%
Max. Camber pos.	= 43.17%
Number of Panels	= 157

A la figura 4.14 obtenim la representació gràfica de la distribució de pressions així com la resultant i el seu punt d'aplicació. També podem observar l'evolució de la capa límit representada en color vermell sobre el perfil.

Observem que el flux per sobre del perfil es comporta en règim laminar en canvi, a la part de sota la línia vermella de la capa límit ens indica que es crea deixant passar de tenir un flux laminar a un flux turbulent.

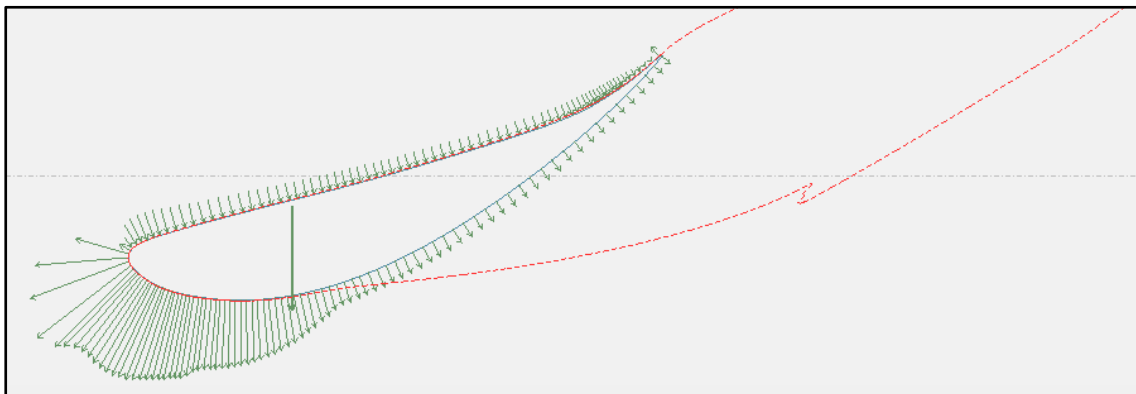


Figura 4.14. Distribució de pressions i capa límit de la secció 1 del perfil de l'aleró posterior. [XFLR5]

La posició del punt d'aplicació de la resultant és; (0.335, -0.057) => (31.63, 5.38) mm respecte del l'origen de coordenades.

Taula 4.5. Resum de resultats de la secció 1 de l'aleró posterior amb angle d'atac de 20°.

Velocitat (km/h)	Mach	Reynolds	C_L/C_D	C_L	C_D	F_L (N)	F_D (N)
60,0	0,0490	104238,41	9,92	1,875	0,189	26,05	2,63
70,0	0,0571	121611,48	10,64	1,926	0,181	36,42	3,42
80,0	0,0653	138984,55	10,96	1,95	0,178	48,16	4,40
90,0	0,0735	156357,62	10,99	1,956	0,178	61,14	5,56
100,0	0,0816	173730,68	11,01	1,96	0,178	75,63	6,87
110,0	0,0898	191103,75	10,94	1,959	0,179	91,47	8,36
120,0	0,0980	208476,82	10,87	1,956	0,18	108,69	10,00
130,0	0,1061	225849,89	10,73	1,953	0,182	127,36	11,87
140,0	0,1143	243222,96	10,64	1,948	0,183	147,33	13,84
150,0	0,1224	260596,03	10,57	1,944	0,184	168,78	15,98
160,0	0,1306	277969,09	10,44	1,941	0,186	191,74	18,37
170,0	0,1388	295342,16	10,37	1,939	0,187	216,23	20,85
180,0	0,1469	312715,23	10,30	1,937	0,188	242,17	23,50

Un cop obtinguda la taula de resultats, taula 4.5 amb els coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç i les forces respecte les velocitats podem determinar la tendència d'aquests coeficients així com veiem en la figura 4.15 i 4.16.

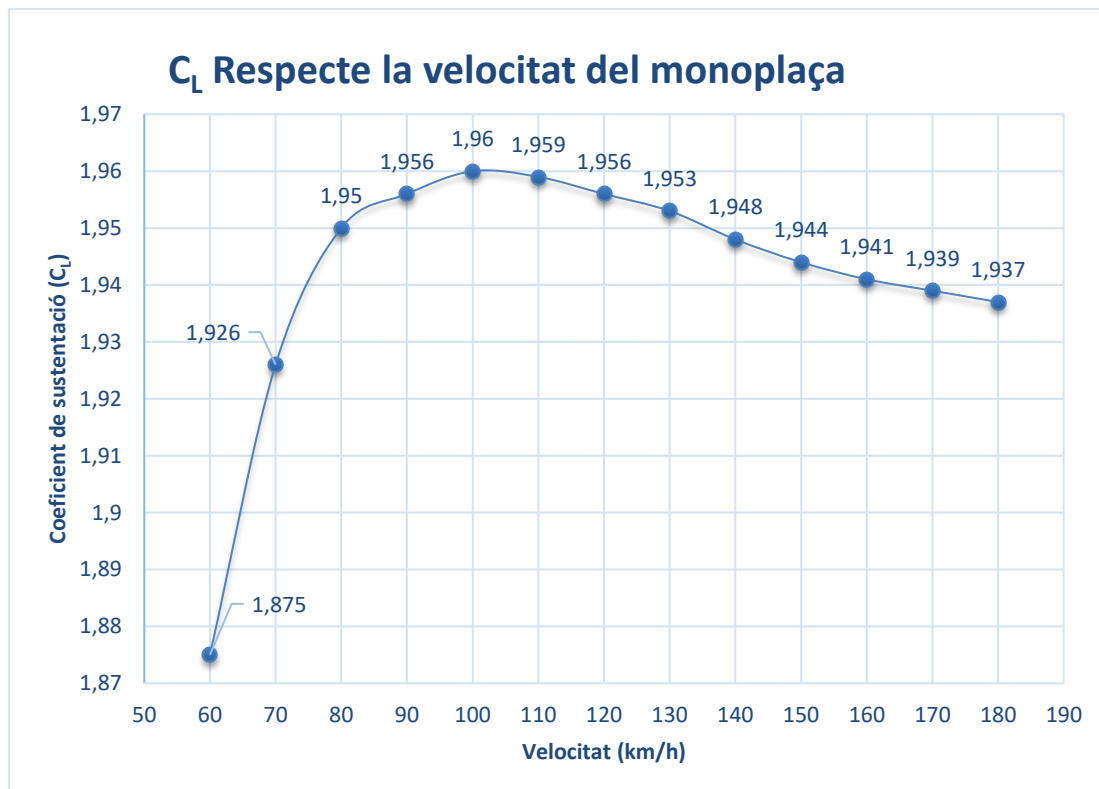


Figura 4.15. Tendència del coeficient d'anti-sustentació bidimensional (C_L) de la secció nº1 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

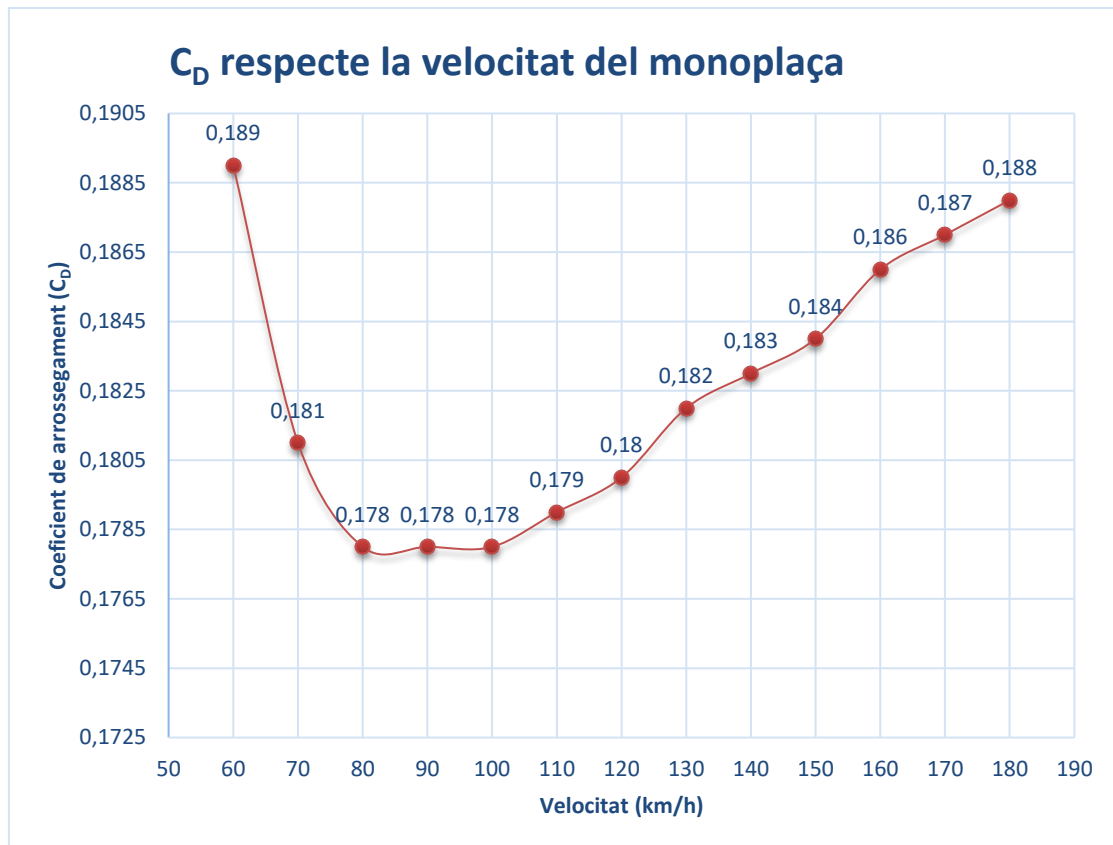


Figura 4.16. Tendència del coeficient d'arrossegament bidimensional (C_D) de la secció n°1 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

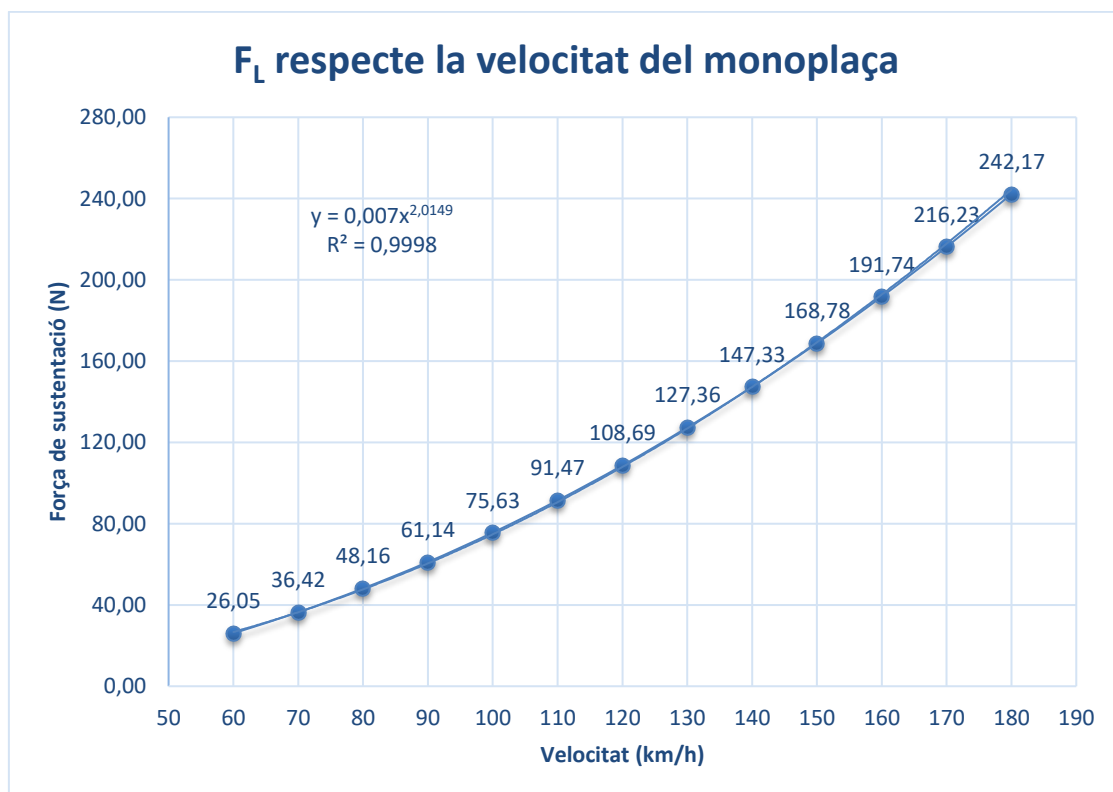


Figura 4.17. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) de la secció n°1 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

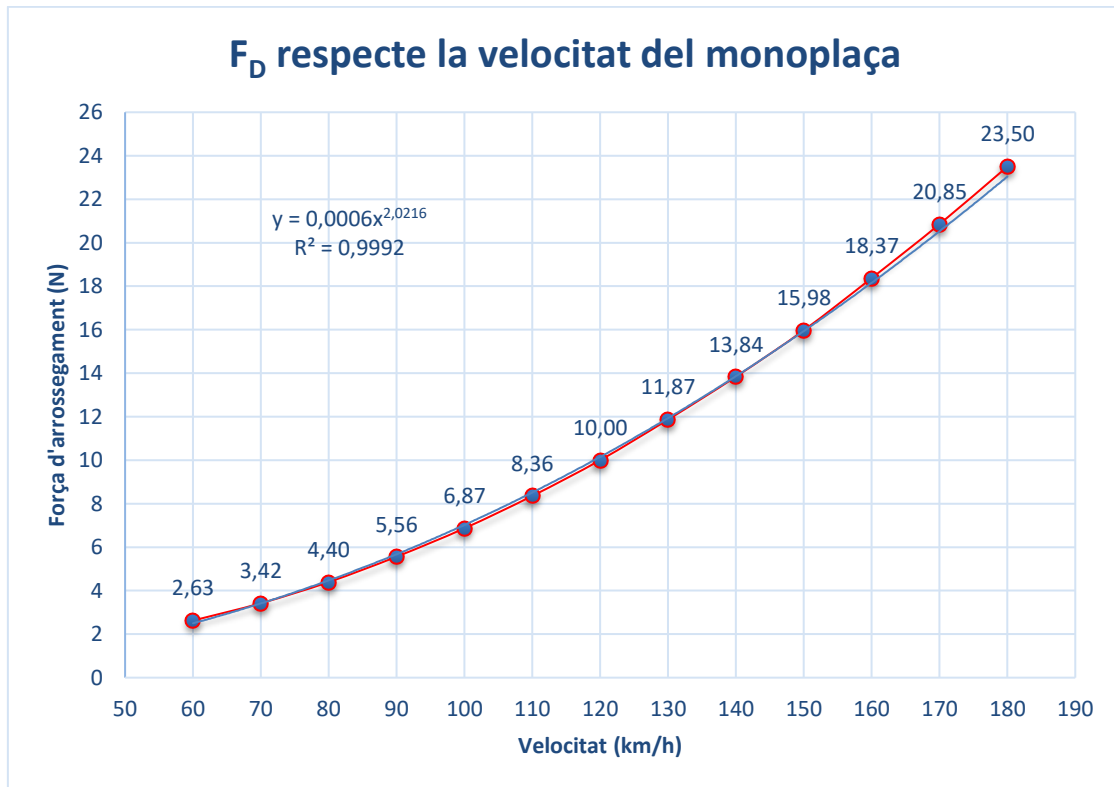


Figura 4.18. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) de la secció nº1 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

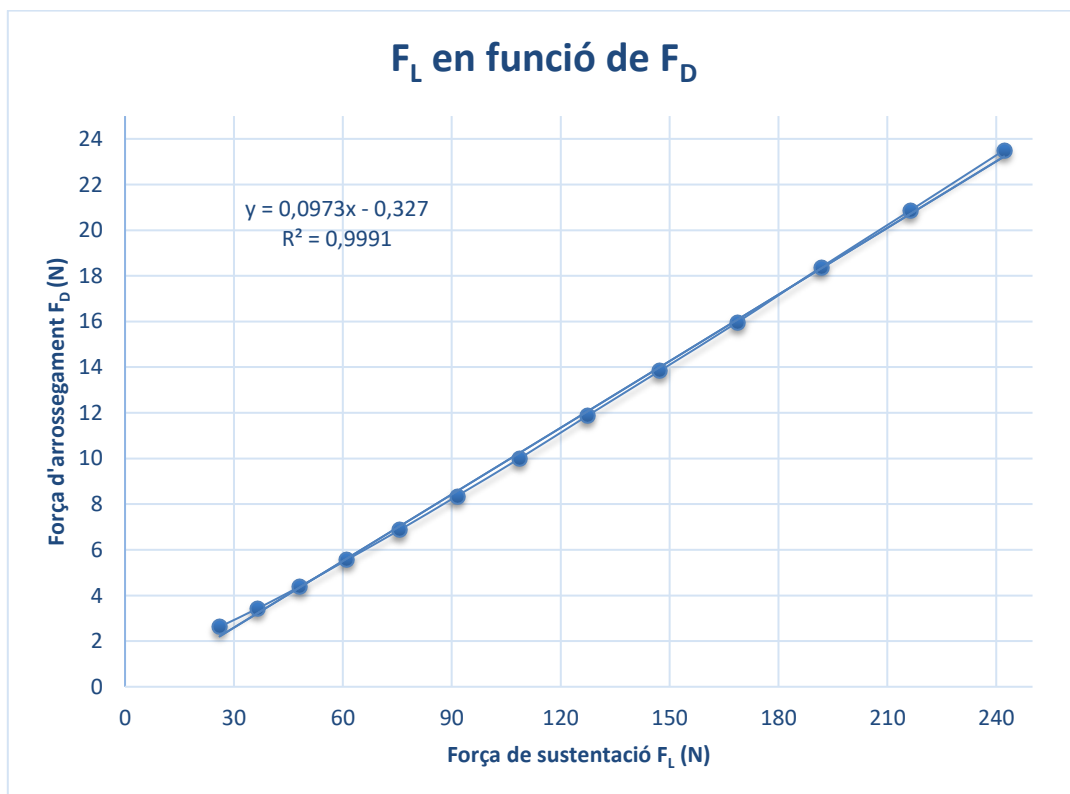


Figura 4.19. Tendència de la força d'anti-sustentació bidimensional (F_L) respecte la força d'arrossegament (F_D) de la secció nº1 de l'aleró posterior. [Autor]

En el cas d'aquesta primera secció ens centrarem en millorar-lo, no tan sols amb la configuració del seu angle d'atac, sinó també amb una implementació de un sistema "DRS".

Secció 2 del l'aleró posterior

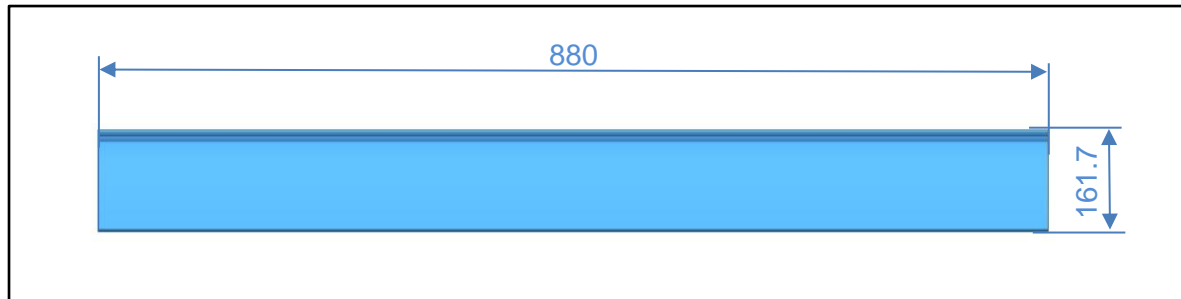


Figura 4.20. Cotes generals de la secció 2 de l'aleró posterior. [Autor]

Un cop obtingudes les coordenades (Taula 4.4 de l'Annex 2) per poder modelar el segon perfil de l'aleró posterior, realitzem el modelat amb Siemens NX i obtenim el perfil com veiem en la figura 4.21.

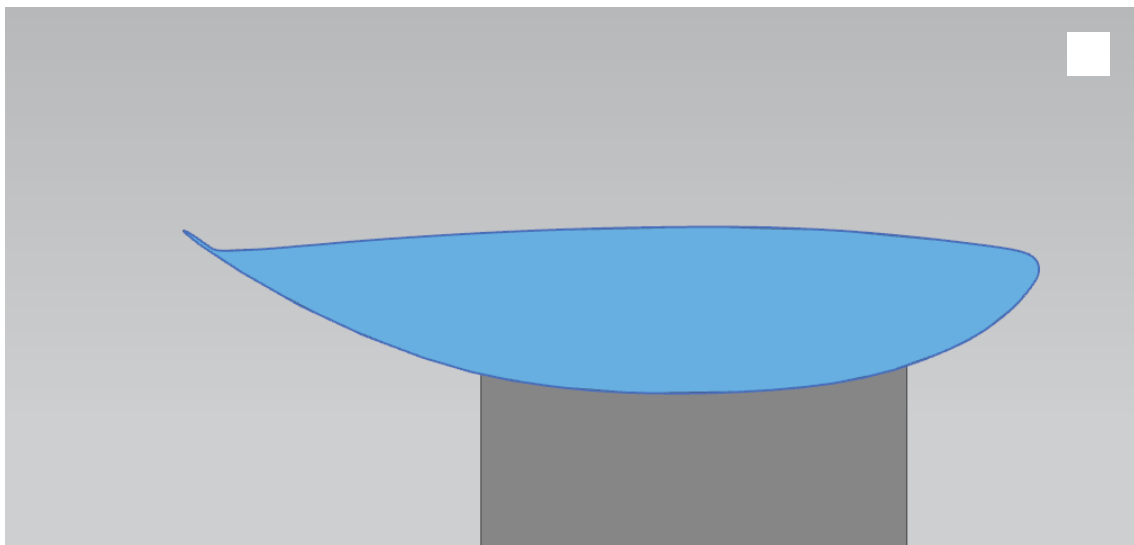


Figura 4.21. Secció nº2 del perfil posterior. [Autor]

Taula 4.6. Característiques de la secció 2 del perfil de l'aleró posterior.

Seccio 2 alero posterior	
Thickness	= 21.15%
Max. Thick.pos.	= 39.45%
Max. Camber	= 5.52%
Max. Camber pos.	= 100.80%
Number of Panels	= 157

A la figura 4.22 obtenim la representació gràfica de la distribució de pressions així com la resultant i el seu punt d'aplicació. També podem observar la capa límit representada en color vermell sobre el perfil.

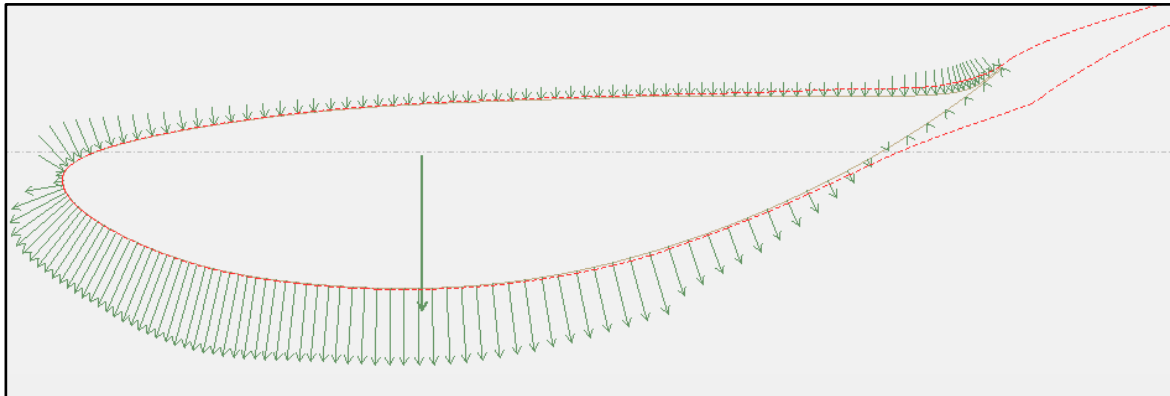


Figura 4.22. Distribució de pressions i capa límit de la secció 2 del perfil de l'aleró posterior. [XFLR5]

La posició del punt d'aplicació de la resultant és; (0.394, 0.008) => (110.32, 2.24) mm
Com observem en la figura 4.21, podem observar, a partir de les línies vermelles que el gruix de la capa límit és molt petit com correspon a un flux laminar.

Taula 4.7. Resum de resultats de la secció 2 de l'aleró posterior amb angle d'atac de 4°

Velocitat (km/h)	Mach	Reynolds	C_L/C_D	C_L	C_D	F_L (N)	F_D (N)
60,0	0,0490	178520,97	17,41	0,975	0,056	23,21	1,33
70,0	0,0571	208274,47	26,88	1,156	0,043	37,45	1,39
80,0	0,0653	238027,96	53,41	1,442	0,027	61,02	1,14
90,0	0,0735	267781,46	64,71	1,553	0,024	83,17	1,29
100,0	0,0816	297534,95	68,13	1,567	0,023	103,60	1,52
110,0	0,0898	327288,45	73,27	1,612	0,022	128,96	1,76
120,0	0,0980	357041,94	78,48	1,648	0,021	156,90	2,00
130,0	0,1061	386795,44	84,75	1,695	0,02	189,39	2,23
140,0	0,1143	416548,93	89,47	1,7	0,019	220,29	2,46
150,0	0,1224	446302,43	90,53	1,72	0,019	255,86	2,83
160,0	0,1306	476055,92	91,00	1,729	0,019	292,64	3,22
170,0	0,1388	505809,42	91,79	1,744	0,019	333,22	3,63
180,0	0,1469	535562,91	98,06	1,765	0,018	378,08	3,86

Un cop obtinguda la taula de resultats (taula 4.7), amb els coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç respecte a les velocitats podem determinar la tendència d'aquests coeficients així com veiem en la figura 4.22 i 4.23.

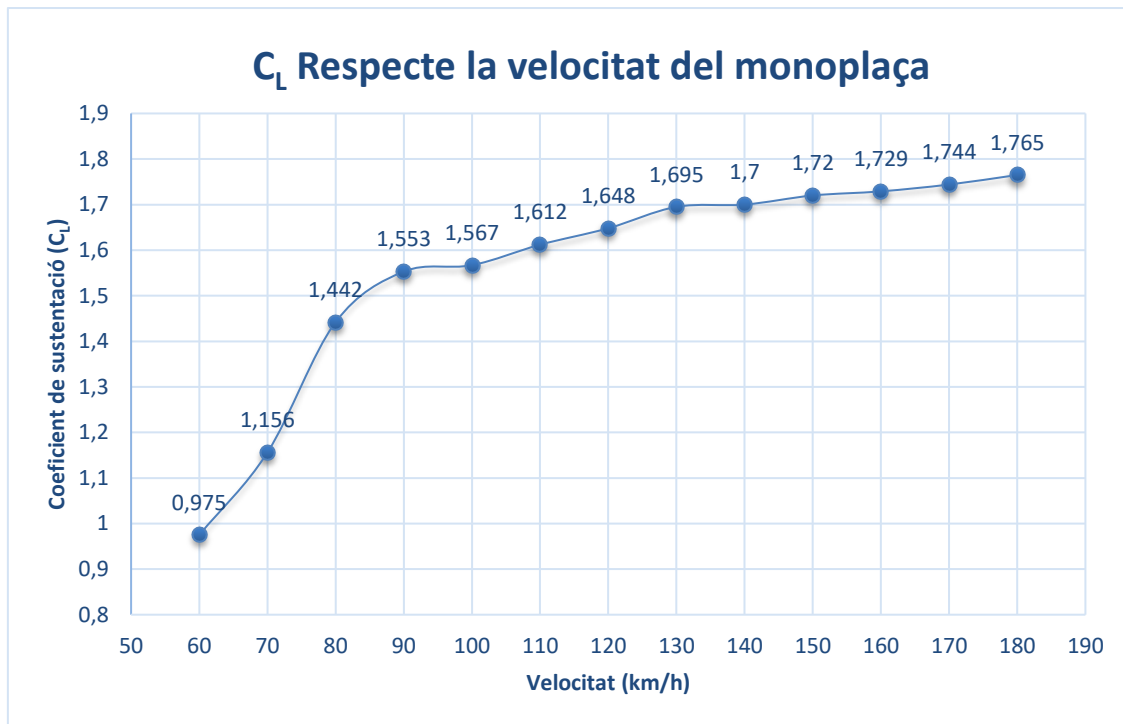


Figura 4.23. Tendència del coeficient d'anti-sustentació bidimensional (C_L) de la secció n°2 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

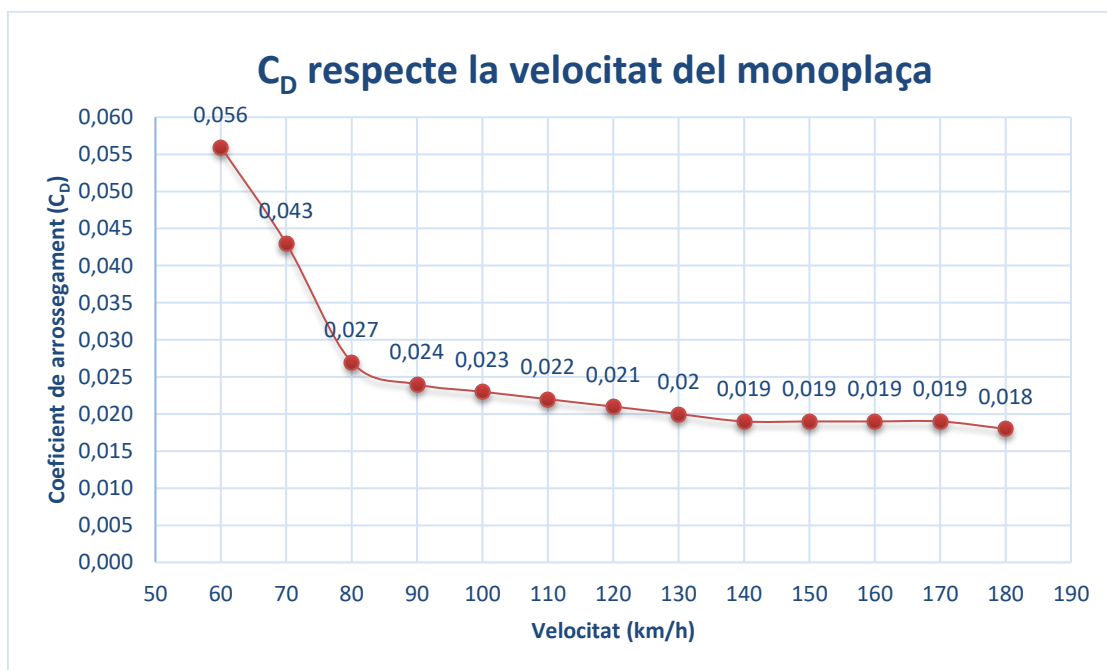


Figura 4.24. Tendència del coeficient d'arrossegament bidimensional (C_D) de la secció n°2 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

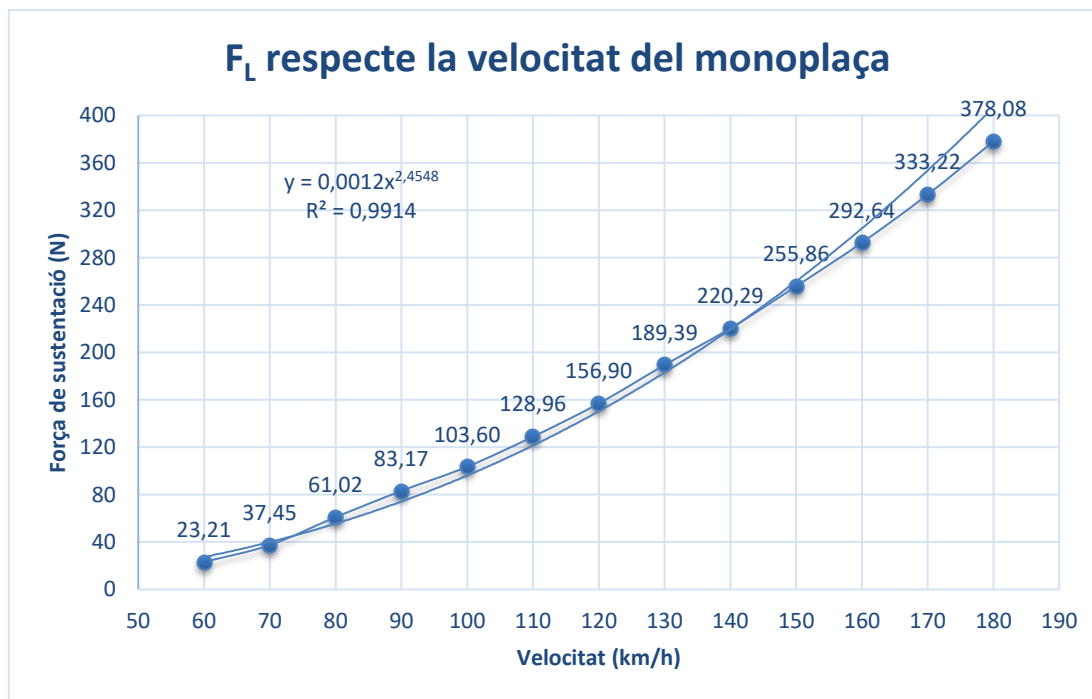


Figura 4.25. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) de la secció n^o2 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

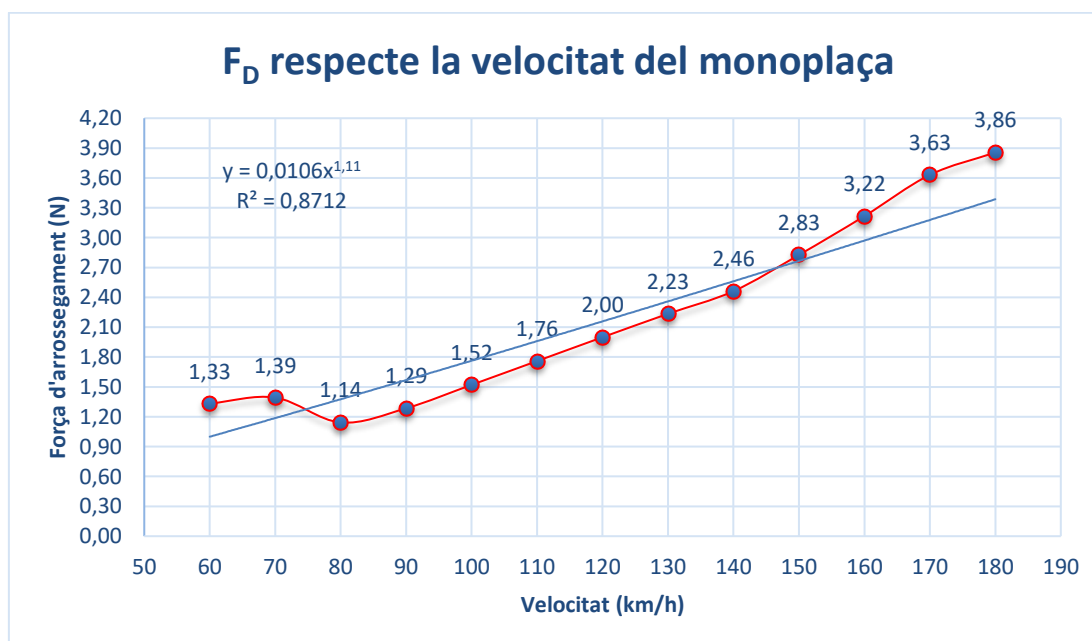


Figura 4.26. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) de la secció n^o2 de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

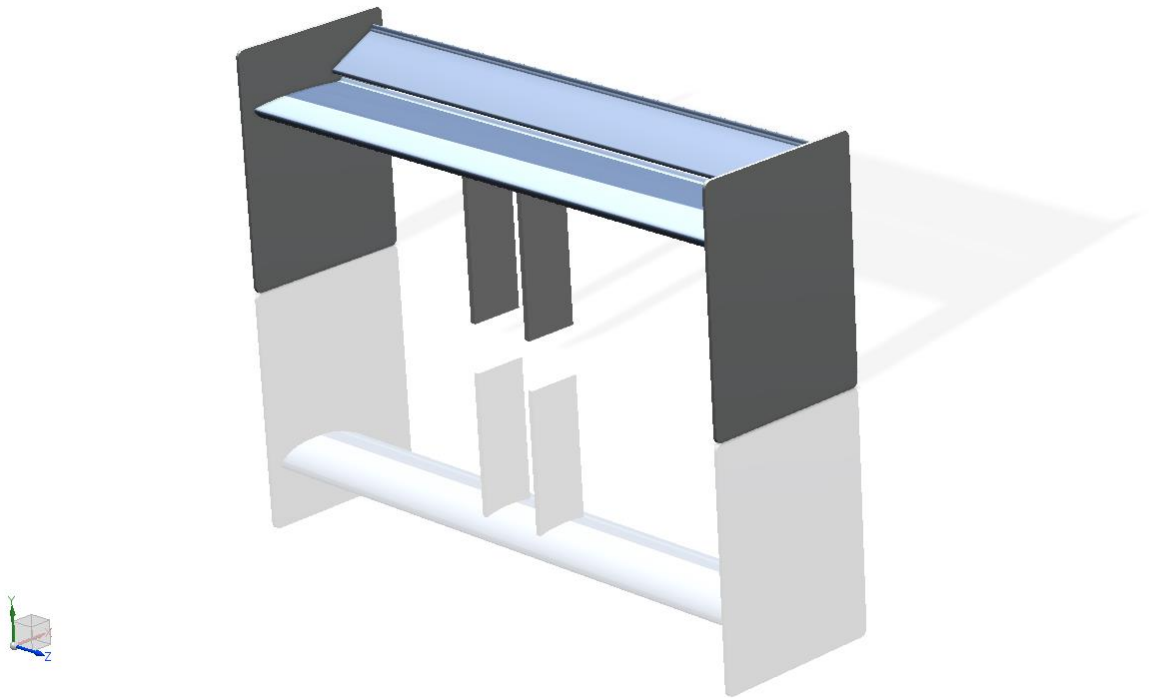


Figura 4.27. Assemblatge del aleró posterior del monoplaça. [Autor]

Resultats de l'aleró posterior.

Les càrregues aerodinàmiques que intervenen en l'aleró posterior es deuen a les forces que cada perfil suposa al conjunt. Aquestes forces es sumen en forma vectorial, determinant una nova força resultant aplicada a tot el conjunt. (taula 4.8)

Taula 4.8. Resum de resultats de l'aleró posterior

Velocitat (km/h)	Secció 1 ($\alpha=20^\circ$)		Secció 2 ($\alpha=4^\circ$)		Total	
	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)
60,00	26,05	2,63	23,21	1,33	49,25	3,96
70,00	36,42	3,42	37,45	1,39	73,87	4,82
80,00	48,16	4,40	61,02	1,14	109,17	5,54
90,00	61,14	5,56	83,17	1,29	144,30	6,85
100,00	75,63	6,87	103,60	1,52	179,23	8,39
110,00	91,47	8,36	128,96	1,76	220,42	10,12
120,00	108,69	10,00	156,90	2,00	265,58	12,00
130,00	127,36	11,87	189,39	2,23	316,75	14,10
140,00	147,33	13,84	220,29	2,46	367,62	16,30
150,00	168,78	15,98	255,86	2,83	424,64	18,80
160,00	191,74	18,37	292,64	3,22	484,37	21,59
170,00	216,23	20,85	333,22	3,63	549,46	24,48
180,00	242,17	23,50	378,08	3,86	620,25	27,36

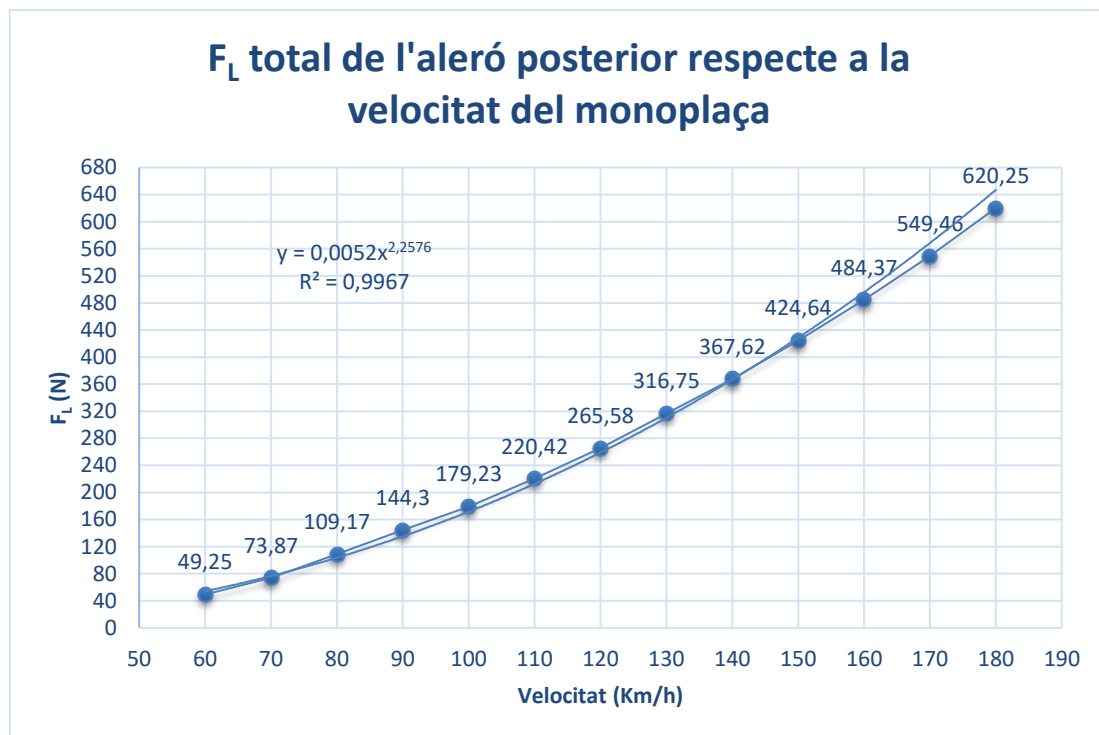


Figura 4.28. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) total de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

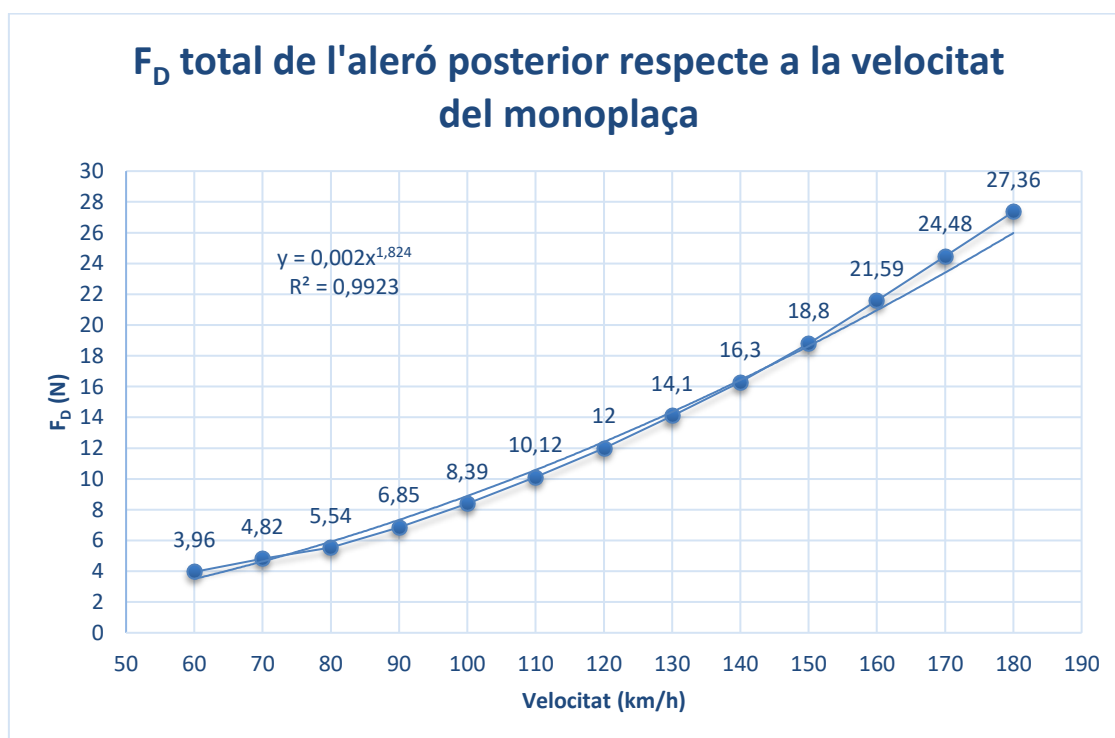


Figura 4.29. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) total de l'aleró posterior en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

4.3. Resultats de l'estudi bidimensional

Taula 4.9. Resum resultats de l'estudi bidimensional.

Velocitat (km/h)	Aleró davanter		Aleró posterior		Total	
	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)
60,00	64,03	0,64	49,04	3,94	113,07	4,58
70,00	87,95	0,78	73,54	4,79	161,49	5,58
80,00	114,97	0,99	108,69	5,51	223,66	6,50
90,00	145,58	1,22	143,66	6,82	289,24	8,04
100,00	179,81	1,46	178,44	8,35	358,25	9,82
110,00	217,77	1,75	219,45	10,07	437,21	11,82
120,00	259,86	2,06	264,40	11,95	524,27	14,01
130,00	304,98	2,39	315,34	14,04	620,32	16,43
140,00	354,02	2,74	365,99	16,23	720,01	18,97
150,00	407,50	3,11	422,76	18,72	830,26	21,83
160,00	464,06	3,50	482,22	21,50	946,28	24,99
170,00	524,35	3,90	547,02	24,38	1071,37	28,28
180,00	588,38	4,21	617,49	27,24	1205,87	31,46

A partir de l'estudi bidimensional dels alerons obtenim una càrrega aerodinàmica d'anti-sustentació total a una velocitat de 130km/h de 620.32 N i una càrrega d'arrossegament de 16.43 N. (taula 4.9)

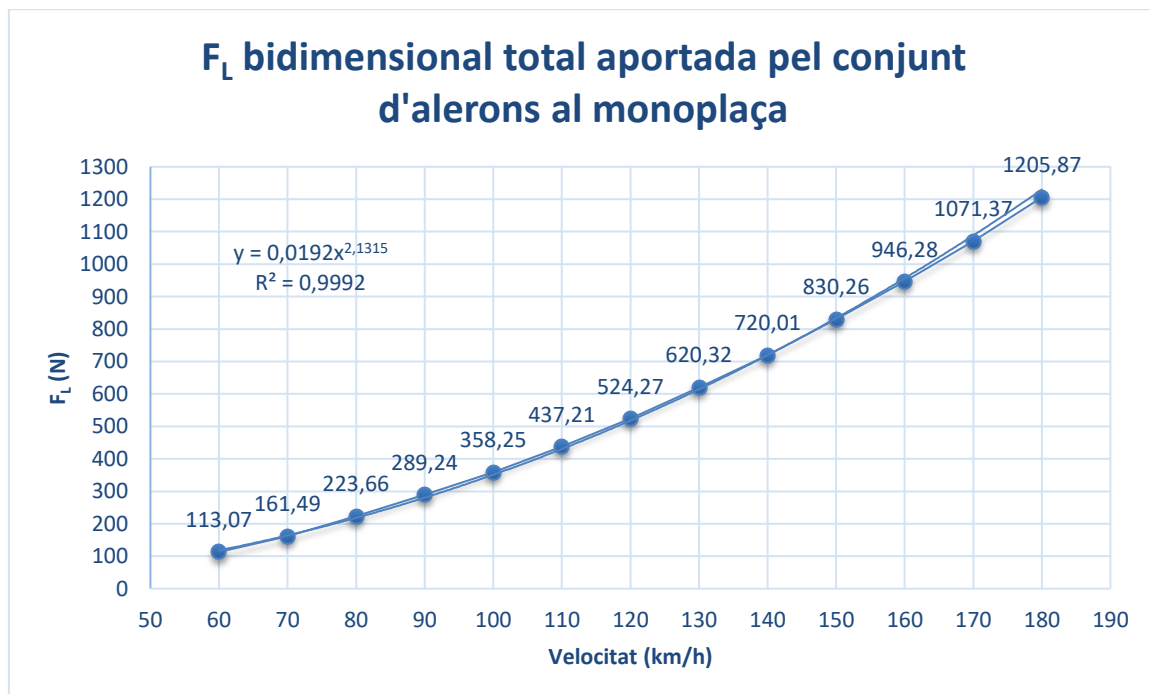


Figura 4.30. Tendència de la força de sustentació bidimensional (F_L) total aportada pel conjunt d'alerons al monoplaça en relació a la velocitat. [Autor]

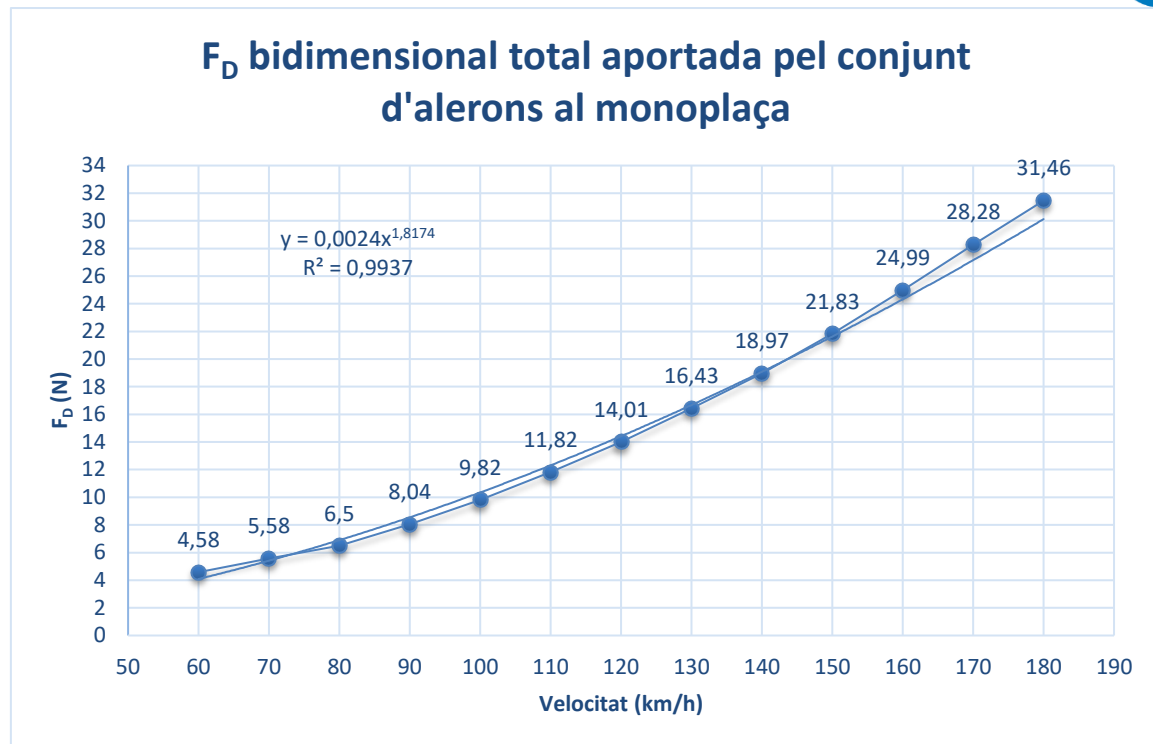


Figura 4.31. Tendència de la força d'arrossegament bidimensional (F_D) total aportada pel conjunt d'alerons al monoplaça en relació a la velocitat. [Autor]

5. SIMULACIÓ EXPERIMENTAL

En aquest apartat hem utilitzat la bibliografia [2], [4], [29], [Annex 2]

5.1. Túnel de vent

Un túnel de vent és un eina d'investigació que estudia l'aerodinàmica i els seus efectes al voltant d'un cos sòlid, com pugui ser un vehicle, un avió, un vaixell, entre altres.

Amb aquesta eina es simulen les condicions a les quals estan sotmesos els cossos per fer una extrapolació a les situacions reals. Normalment, els túnels de vent són de mesures limitades i per això necessitem fer l'estudi amb un model a escala reduïda. La forma de treballar del túnel és que l'objecte sòlid es manté estable sense moure's mentre que el flux d'aire o gas utilitzat passa al voltant d'ell.

Tipus de túnel de vent.

Els túnels de vent es classifiquen per dos grans aspectes,

- Depenent de la circulació de l'aire al seu interior.
 - Obert (A): S'agafa l'aire directament de l'atmosfera, es fa passar per la cambra d'assajos i després es retorna a l'atmosfera.
 - Tancat (B): L'aire circula en un conducte tancat passant diverses vegades per la cambra d'assajos.

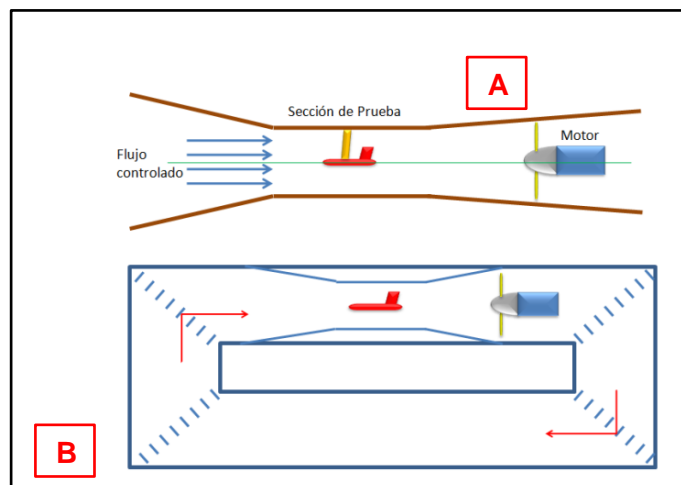


Figura 5.1. Esquema del tipus de túnel de vent segons la circulació. A: Túnel obert, B: Túnel tancat. [29]

- Depenent de la velocitat del flux al seu interior.
 - Subsònic: $M = (0, 0.7)$
 - Transsònic: $M = (0.7, 1.2)$
 - Supersònic: $M = (1.2, 5)$
 - Hipersònic: $M > 5$








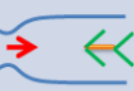
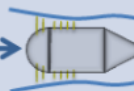



Régimen de Velocidad	Flujo Típico (Modelo)	Sección de Entrada	Radio de Compresión	Motor o sistemas de motor
Subsónico ($M = 0 - 0.7$)			1.0+	
Transónico ($M = 0.7 - 1.2$)			1.1	
Supersónico ($M = 1.2 - 5$)			2 ($M = 2$)	
Hipersónico ($M > 5$)			20 ($M = 5$)	

Figura 5.2. Esquema del tipus de túnel de vent segons la velocitat del Fluid. [29]

Parts del túnel de vent.

- Ventilador: És l'encarregat de produir la corrent d'aire al circuit. És necessari proporcionar la velocitat adequada per fer les mesures exactes.
- Cambra d'assajos: És la cambra principal del túnel i és on es situa el model a estudiar. Les dimensions d'aquesta són les que ens determinen el model a estudiar i l'aplicació de les lleis de semblança per dissenyar el model a l'escala pertinent, així com les especificacions de la velocitat del fluid i el nombre de Reynolds.
- Estabilitzadors de corrent: Impossibiliten la recirculació al ventilador i creació del flux que estem cercant.
- Finestres d'equilibrament de pressions: Ens permeten l'equilibrament de pressions i anular les oscil·lacions provocades per aquestes.
- Difusor: El difusor té l'objectiu de reduir la velocitat del fluid i recuperar la pressió estàtica. Així com aconseguir que el fluid torni a règim laminar si és possible. Aquests són molt sensibles a les variacions i en els errors de disseny i poden provocar vibracions en el túnel.
- Con de contracció: El con de contracció té la funcionalitat d'augmentar la velocitat del fluid.

Funcionament d'un túnel de vent.

En primer lloc el flux pot ser aspirat o impulsat pel ventilador, aquest flux passa pel conducte a través dels estabilitzadors de corrent que determinen el flux que volem aconseguir a la cambra d'assajos. Pot ser flux de règim laminar, (els estabilitzadors seran paral·lels al flux per proporcionar un flux sense turbulències) o per altre banda si necessitem un flux en règim turbulent, aquests estabilitzadors en proporcionaran certa resistència i es crearan turbulències que arribaran fins a la cambra principal.

En la cambra principal o cambra d'assajos, els models es col·loquen en un equip de pressa de dades que són les balances de forces (o balances dinamomètriques) en les quals estan col·locats els sensors que determinen les forces aerodinàmiques aplicades per a cada eix. A partir d'aquests sensors posteriorment processarem la informació recollida per determinar els coeficients d'arrossegament i d'anti-sustentació així com les forces totals aplicades. Aquestes càlculs ens determinaran si és factible l'ús del model real.

També trobem altres sensors com són els sensors de la pressa de dades de les pressions. Un cop obtinguts tots el valors proporcionats, aquestes dades han de ser contrarestades amb les dades i càlculs teòrics tenint en gran consideració el nombre de Reynolds i el nombre de Mach que són fonamentals per la validació en les proves de semblança dels models a escala.

Carències del túnel de vent.

- Limitacions per l'escala.

Aquestes limitacions es deuen a una disminució de l'escala. Per exemple si un model es redueix la seva escala geomètrica, la velocitat que hauríem d'utilitzar ha de ser superior a la velocitat real.

- Dimensions del model.

Tenim la necessitat d'arribar a un punt mitjà entre l'escala escollida, i les dimensions del túnel de vent. Aquest punt en gran part esdevé per els costos que ens duen simular el cas en un túnel de vent major. També hem de tenir present la representació del nombres de Reynolds i de Mach i a vegades aquests nombres en escala real són impossible representar-los.

- Problemes d'interferència. *Efecte Bloqueig.*

Els problemes de interferència o efecte bloqueig degut al flux és un problema que ha de ser tractat amb les consideracions necessàries dels càlculs teòrics obtinguts. El bloqueig del flux apareix en les proves on el model a estudiar és relativament gran respecte l'àrea de la cambra d'assajos del túnel de vent que és limitada. L'àrea de bloqueig no pot ser superior al 10% de l'àrea transversal total de la cambra d'assajos.

El gran problema que esdevé quan l'àrea de bloqueig és superior a l'àrea màxima dissenyada per al túnel és que es veu incrementada la pressió en les parets del túnel. Aquest fet, fins i tot, és perillós ja que si l'increment de pressió és considerable, les parets poden no resistir-la i rompre's. Per aquest fet, els túnels oberts són els més utilitzats perquè en el cas de sobrepassar la limitació de l'àrea de bloqueig de l'aire tendeixen a tenir una via d'escapament al contrari del túnels tancats. Per altra banda, les proves realitzades amb un efecte de bloqueig elevat necessiten correccions que tinguin present aquest augment de pressió.

El bloqueig de la cambra d'assajos ve determinat per:

$$\text{Efecte Bloqueig} = \frac{L^2}{A}$$

Així com la pressió sobre les parets de la cambra és:

$$\text{Pressió en les parets} = \rho * V^2$$

On L és la longitud del model (m), A és l'àrea de la secció transversal de la cambra d'assajos (m²), V és la velocitat del fluid (m/s) i ρ és la densitat del fluid (kg/m³).

Túnel de vent utilitzat.



Figura 5.3. Túnel de vent utilitzat del campus de Terrassa (ESEIAAT).[Autor]

Un cop realitzat el marc teòric ens centrem a estudiar les dimensions necessàries per realitzar l'estudi experimental en el túnel de vent. El túnel de vent que utilitzarem és un túnel de circuit tancat però amb una zona d'assaigs oberta que es troba al campus de Terrassa com veiem en la figura 5.3.

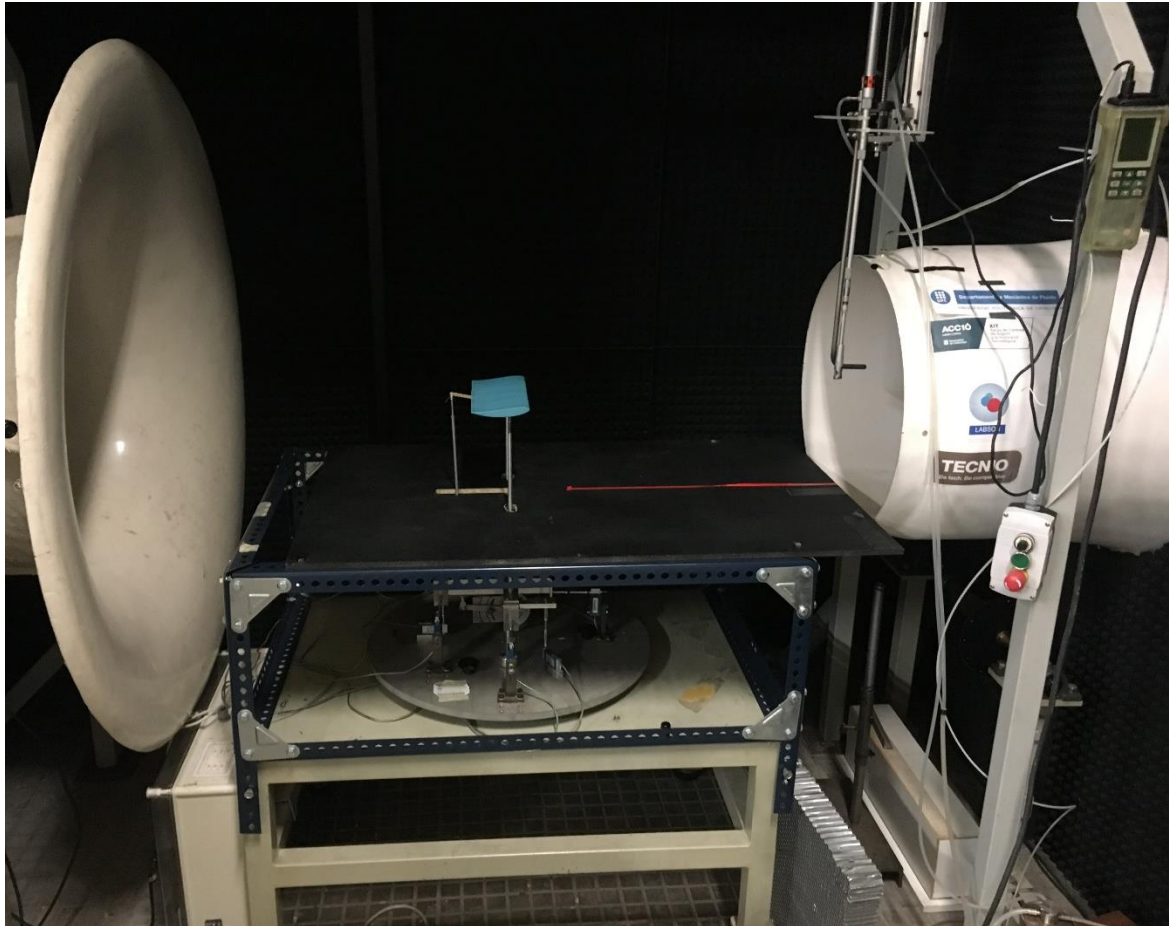


Figura 5.4. Cambra d'assaigs oberta del túnel de vent utilitzat (ESEIAAT). [Autor]

Dimensions útils i limitacions del túnel de vent utilitzat.

Les dimensions útils del túnel són de 500 mm en la zona d'assaigs (figura 6.4) però el model no pot superar els 300 mm de envergadura. A aquestes mesures hem de tenir en compte que l'àrea de bloqueig no pot superar el 10% de l'àrea de flux.

Per altra banda, ens trobem les restriccions de les forces que poden obtenir de balances aerodinàmiques i aquestes són de 10 N per la força d'arrossegament (FD) i 40 N per la força de sustentació (FL). I pel que fa a les velocitats del túnel van de 8 m/s fins a un màxim de 40 m/s.

5.2. Fabricació dels models en impressió 3D

Ens centrem amb la impressió 3D com a forma de fabricar els models a estudiar. La fabricació i/o prototipatge 3D és actualment el sistema més utilitzat per les mitjanes i petites empreses així com per les “Startups” que tinguin la necessitat d'imprimir els models que necessiten estudiar, prèviament calculats i modelats amb sistemes de simulació gràfica CAD/CAM/CAE.

Aquest nou sistema és més ràpid que els modelatges de prototipus antics que es basaven en crear manualment el model per poder fer els estudis experimentals. Aquest fet tenia el gran inconvenient que un cop fabricat el primer model, si a aquest s'aplicaven millores o canvis es tenia que tornar a fabricar de nou. Com que el procés de fabricació era un procés llarg i costós, les empreses intentaven fer el mínim de models i el mínim de modificacions. Per conseqüent, amb el sistema antic de prototipatge era més difícil arribar a un model amb les especificacions que es volien assolir com òptimes.

Com veiem actualment, amb el modelat 3D a partir d'un arxiu CAD calculat i dissenyat per ordinador, ens és més fàcil modificar-lo i assolir les competències necessàries. Així com poder-lo imprimir amb les impressores de prototipatge 3D que tenim avui en dia.

5.2.1. Preparació dels models.

Per aconseguir el model adient per realitzar l'estudi experimental en el túnel de vent necessitem fer un estudi de semblança de les dimensions i característiques del prototipus teòric. Un cop realitzat l'estudi observarem si ens trobem en semblança completa o incompleta, i a partir d'aquest fet determinarem el paràmetres a tenir en compte segons les limitacions del túnel de vent.

Un cop obtingudes totes les característiques i dimensions del model a fabricar, procedirem a fer un petit estudi del sistema de subjecció dels alerons a les balances dinamomètriques del túnel de vent.

Seguidament procedirem a obtenir l'arxiu en format “.STL” necessari per enviar-lo a la impressora 3D i executar l'operació.

5.2.1.1. Estudi de semblança.

En molts de casos, per resoldre problemes científics no ens és suficient fer-ho mitjançant fórmules analítiques i per això cal recórrer a assaigs experimentals i a les tècniques computacionals “CFD”.

El fet d'haver de realitzar un estudi experimental ens obri un altre inconvenient en l'espai i les condicions que disposem per la realització de l'estudi. Aquestes condicions del prototipus real, en la majoria de casos, no les podem satisfer ja que són força difícil o impossible de modelar.

Per poder arribar a aconseguir unes condicions òptimes i poder realitzar l'assaig amb garanties utilitzem l'anàlisi dimensional per obtenir els paràmetres més influents i amb major rigor.

Anàlisi dimensional

L'anàlisi dimensional és un mètode que ens permet reduir el nombre i complexitat de les variables que intervenen en cada fenomen que haurem d'estudiar. Per exemple si un fenomen depèn de "n" magnituds físiques (gravetat, densitat, força,...), les quals contenen "k" magnituds fonamentals (massa, longitud, temps, temperatura,...) l'aplicació de l'anàlisi dimensional redueix el problema agrupant aquestes magnituds en paràmetres adimensionals i obtenim;

$$\text{paràmetres adimensionals} = n - k$$

Un paràmetre adimensional és un conjunt de variables que quan les agrupem la seva magnitud és la unitat.

En el cas de l'estudi experimental recorrem a aquest tipus d'anàlisi perquè ja ens determina les variables que no hem de tenir en compte, ens ajuda a estalviar temps i per conseqüència diners i ens presenten les lleis d'escala que ens serveixen per fer l'estudi de semblança passant les dimensions del prototipus a les del model.

El teorema Pi de Buckingham

Com hem determinat abans, els paràmetres adimensionals establerts per la diferència entre el nombre de variables implicades en el problema i el nombre de dimensions fonamentals seria la base del teorema "pi"

$$\pi_i = n - k$$

Aquest teorema determina el nombre de paràmetres adimensionals que intervenen en el problema però no ens indica quins paràmetres són.

Exemple d'aplicació del teorema pi de buckingham en el nostre estudi.

Determinació dels paràmetres per el càlcul de la força de sustentació F_L d'un aleró que depèn de:

$$F_L = f(L, v, c, \alpha, \rho, \mu, v_s)$$

On L és la longitud del perfil (m), v és la velocitat del flux ($\frac{m}{s}$), c és l'amplada del perfil (m), α és l'angle d'atac ($^\circ$), ρ és la densitat del fluid ($\frac{kg}{m^3}$), μ és la viscositat cinemàtica del fluid ($\frac{m^2}{s}$) i v_s és la velocitat del so ($\frac{m}{s}$).

Si tenim vuit variables i tres paràmetres fonamentals, aplicant l'equació del teorema ens dóna;

$$\pi_i = 8 - 3 = 5\pi$$

L'equació ens determina que hem d'obtenir cinc paràmetres adimensionals.

Taula 5.1. Magnituds de les variables estudiades.

	M (kg)	L (m)	T (s)
$F_L \left(\frac{kgm}{s^2} \right)$	1	1	-2
$L (m)$	0	1	0
$v \left(\frac{m}{s} \right)$	0	1	-1
$C (m)$	0	1	0
α	-	-	-
$\rho \left(\frac{kg}{m^3} \right)$	1	-3	0
$\mu \left(\frac{m}{s^2} \right)$	1	-1	-1
$v_s \left(\frac{m}{s} \right)$	0	0	-1

D'entrada determinem que l'angle d'atac " α " ja és considerat un paràmetre adimensional. Hem d'escollir "k=3" variables repetitives i determinarem la resta de paràmetres dependents. En aquest cas escollim la longitud, la velocitat i la densitat. Obtenim els paràmetres utilitzant la metodologia del teorema.

$$\pi_1 = [L]^a * [v]^b * [\rho]^c * F_L$$

$$M^0 L^0 T^0 = [L]^a * [LT^{-1}]^b * [ML^{-3}]^c * MLT^{-2}$$

$$M \Rightarrow c + 1 = 0 \rightarrow c = -1$$

$$L \Rightarrow a + b - 3c + 1 = 0 \rightarrow a + b + 4 = 0 \rightarrow a = -2$$

$$T \Rightarrow -b - 2 = 0 \rightarrow b = -2$$

$$\pi_1 = \frac{F_L}{L^2 * v^2 * \rho}$$

Obtingut el primer paràmetre adimensional, repetim el mateix pas per als altres.

$$\pi_2 = \frac{D}{L}$$

$$\pi_3 = \frac{\mu}{L * v * \rho} \approx Reynolds$$

$$\pi_4 = \frac{v_s}{v} \approx Mach$$

Finalment ens queda:

$$\frac{F_L}{L^2 * v^2 * \rho} = f \left(\frac{D}{L}, \frac{v_s}{v}, \frac{\mu}{L * v * \rho}, \alpha \right) = f \left(\frac{D}{L}, Ma, Re, \alpha \right)$$

Estudi de models.

Per l'estudi de models cal determinar el tipus de semblança que utilitzem, ens podem trobar amb semblança completa o semblança imperfecte o restringida.

- La semblança completa, també denominada perfecte o total és aquella que podem obtenir tots els factors en la mateixa escala sense que tinguem problemes contradictoris. Aquesta es distribueix en tres requisits:

- *Semblança geomètrica.*

La semblança geomètrica com la mateixa paraula ho diu, és la que intervé en les dimensions model i prototip. Es determina que qualsevol longitud del model es relaciona amb la longitud corresponent del prototipus regit per un factor d'escala (λ).

$$\lambda = \frac{L_m}{L_p}$$

- *Semblança cinemàtica.*

La semblança cinemàtica requereix que les velocitats en punts homòlegs del corrent mantinguin la mateixa relació de proporcionalitat i tinguin la mateixa direcció.

- *Semblança dinàmica.*

La darrera i la més important és la semblança dinàmica, aquesta requereix que es mantingui la relació de forces i és necessària complir per tindre semblança total.

- La semblança incompleta, també denominada imperfecte o restringida és aquella que alguns dels paràmetres adimensionals no es satisfan amb el factor de escala determinat. La finalitat d'aquesta és menysprear la importància relativa d'alguns dels paràmetres, majoritàriament els paràmetres menys rellevants, i aconseguir que la resta de paràmetres adimensionals importants s'acompleixin. (taula 5.2)

Taula 5.2. Jerarquia dels paràmetres de semblança segons la seva importància depenent el tipus de test. [Apunts ENFL]

TIPUS DE TEST	PARÀMETRES PRIMARIS	PARÀMETRES SECUNDARIS	PARÀMETRES NORMALMENT IRRELEVANTS
Flux de baixes velocitats sense superfície lliure (conduccions, aerodinàmica)	Re, α	ε/L	We, Fr, Ma, k
Flux amb superfície lliure (vaixells, preses, ports, rius, canals, ...)	Fr	Re, ε/L	We, Ma, k
Flux a altes velocitats	Ma, k, α	Re, ε/L	Fr, We
Màquines de Fluids	v/U	Re, ε/L , Ma	We, k, Fr

Semblança del l'aleró davanter.

Les limitacions del túnel són:

- Àrea d'assaig de 500mm de diàmetres
- Àrea de bloqueig màx. 10% de l'àrea total.
- Longitud màxima d'envergadura del model: 250mm

Característiques de l'aleró real:

- Corda: 280mm
- Envergadura: 1250mm
- Àrea planar : 350000mm²

Suposant que l'àrea de treball en el túnel de vent és una àrea circular de $A_{túnel} = \pi * \frac{D^2}{4} = 196349.54 \text{ mm}^2$ i sabent que hem d'utilitzar un 10% com a màxim obtenim $A_{model} \leq 10\% \text{ de } A_{túnel} = 10\% \text{ de } 196349.54 \text{ mm}^2 = 19634.95 \text{ mm}^2$.

L'àrea de bloqueig del prototipus és de: $A_{b,proto} = 45\text{mm} * 1250\text{mm} = 56250 \text{ mm}^2$

Per les limitacions de mesures en la realització de la impressió 3D dels models dels alerons, i tenint present l'efecte de bloqueig, el factor d'escala utilitzat ha estat de 5:

$$\lambda = \frac{L_m}{L_p} = \frac{c_m}{c_p}$$

$$\lambda^2 = \frac{A_m}{A_p}$$

$$\lambda = \frac{L_m}{L_p} = \frac{250}{1250} = \frac{1}{5}$$

Essent la mesura de corda en el model de:

$$C_m = \frac{C_p}{\lambda} = \frac{280}{1/5} = 56mm$$

Comprovem que l'àrea de bloqueig del model és inferior al 10% de l'àrea de túnel:

$$A_{bloqueig\ model} = 9\ mm * 250mm = 2250\ mm^2$$

$$A_{bloqueig\ model} < 10\% \text{ de } A_{tunnel} \rightarrow 2250\ mm^2 < 19634.95\ mm^2$$

Un cop obtingut el factor d'escala comparem amb la igualtat de Reynolds per determinar si es pot aconseguir la semblança completa.

$$Re_{proto} = Re_{model}$$

$$\frac{v_p * c_p}{\nu_p} = \frac{v_m * c_m}{\nu_m}$$

On v és la velocitat del flux (m/s), L és la longitud característica (m) i ν és la viscositat dinàmica del fluid (m²/s).

A partir d'aquí es podria plantejar la resolució de diverses maneres, una seria proposant les velocitats tant del prototipus com la del model, i obtenir un valor de λ . Un altre opció seria fixar el valor del factor d'escala (λ) i la velocitat màxima del túnel de vent que tenim com a limitació i obtenir un valor de velocitat del prototipus. Amb aquestes opcions ens adonarem amb quin tipus de semblança ens trobem.

Donades les limitacions vistes per a la realització de models a una escala diferent a l'adoptada, optem pel segon cas, fixar el valor del factor d'escala (λ) i la velocitat màxima que es pot assolir en el túnel de vent.

$$v_p = v_m * \left(\frac{L_m}{L_p}\right) * \left(\frac{\nu_p}{\nu_m}\right)$$

$$v_p = 35 \frac{m}{s} * \left(\frac{0.25m}{1.25m}\right) * \left(\frac{\nu_p}{\nu_m}\right) = 7 \frac{m}{s} * \frac{1km}{1000m} * \frac{3600s}{1hr} = \boxed{25.2 \frac{km}{h}}$$

Com veiem el valor màxim de la velocitat que podríem representar com a semblança perfecte seria de $v_p = 25.2 \frac{km}{h}$. A partir d'aquí ja entrariem en semblança imperfecte.

Com que el valor de la velocitat en el prototipus és baix calculem un nou valor de velocitat suposant una simulació experimental de la meitat de l'aleró. Tindríem un perfil real de 625 mm i un model de 250 mm amb una escala 1/2.5.

Suposem una velocitat en el model de 35m/s

$$v_p = 35 \frac{m}{s} * \left(\frac{0.25m}{0.625m} \right) = 14 \frac{m}{s} * \frac{1km}{1000m} * \frac{3600s}{1hr} = \boxed{50.4 \frac{km}{h}}$$

Finalment, mantenint la semblança completa, una velocitat del model de 35m/s i realitzant l'assaig amb mig aleró obtindríem una velocitat del prototipus real de 50.4 m/s.

5.2.2. Preparació per a l'experimentació

Després de fer l'estudi de semblança podem determinar les dimensions del model que volem fer l'assaig en el túnel de vent. En el nostre cas, farem l'assaig amb el perfil de l'aleró davanter sense modificacions. Les dimensions del model a escala ($\lambda=1/5$) a assetjar són:

- Corda: 56 mm
- Envergadura: 250 mm
- Àrea planar: 14000 mm²
- Àrea bloqueig: 2250 mm²

Per altre banda, també hem realitzat un model a escala ($\lambda=1/2.5$) però tan sols hem imprès la meitat del perfil i les dimensions d'aquest són:

- Corda: 112 mm
- Envergadura: 250 mm
- Àrea planar: 28000 mm²
- Àrea bloqueig: 4500 mm²

Determinades les dimensions del model de l'aleró, realitzem els models amb CAD per imprimir-los en 3D a posteriori. Les impressions les realitzem amb material plàstic ABS i com que la impressió 3D té limitacions hem hagut de realitzar el perfil en diverses parts perquè no presenti deformacions.

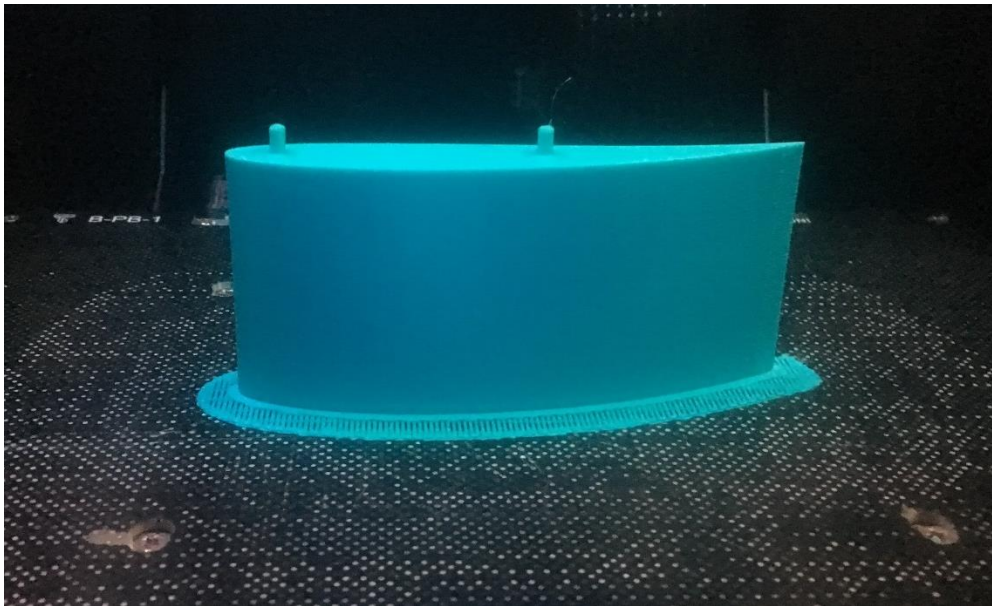


Figura 5.5. Impressió d'una de les parts del perfil de l'aleró. [Autor]

En el cas del model a escala ($\lambda=1/5$) la impressió s'ha realitzat amb dues parts.

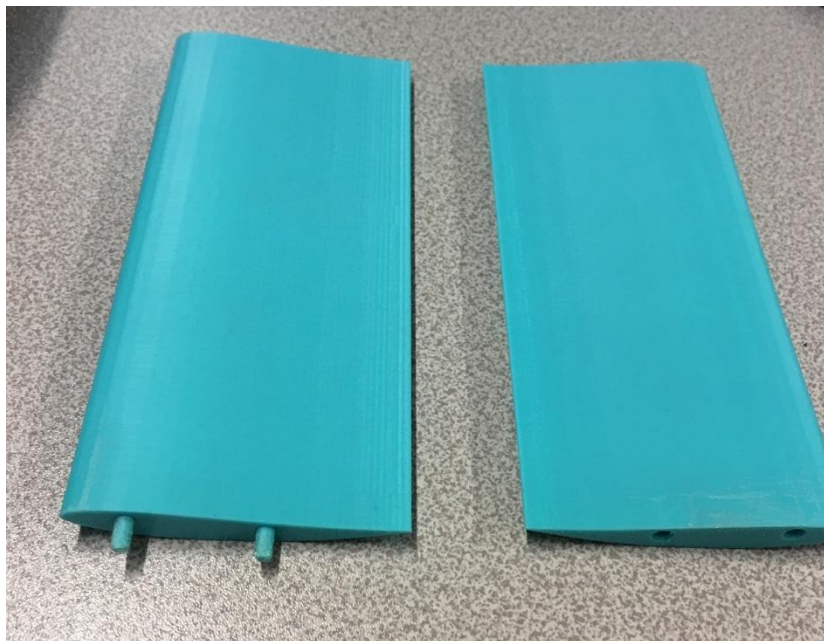


Figura 5.6. Impressió de l'aleró davanter a escala 1/5 en dues parts. [Autor]

En el cas del model a escala ($\lambda=1/2.5$) la impressió s'ha realitzat amb cinc parts.

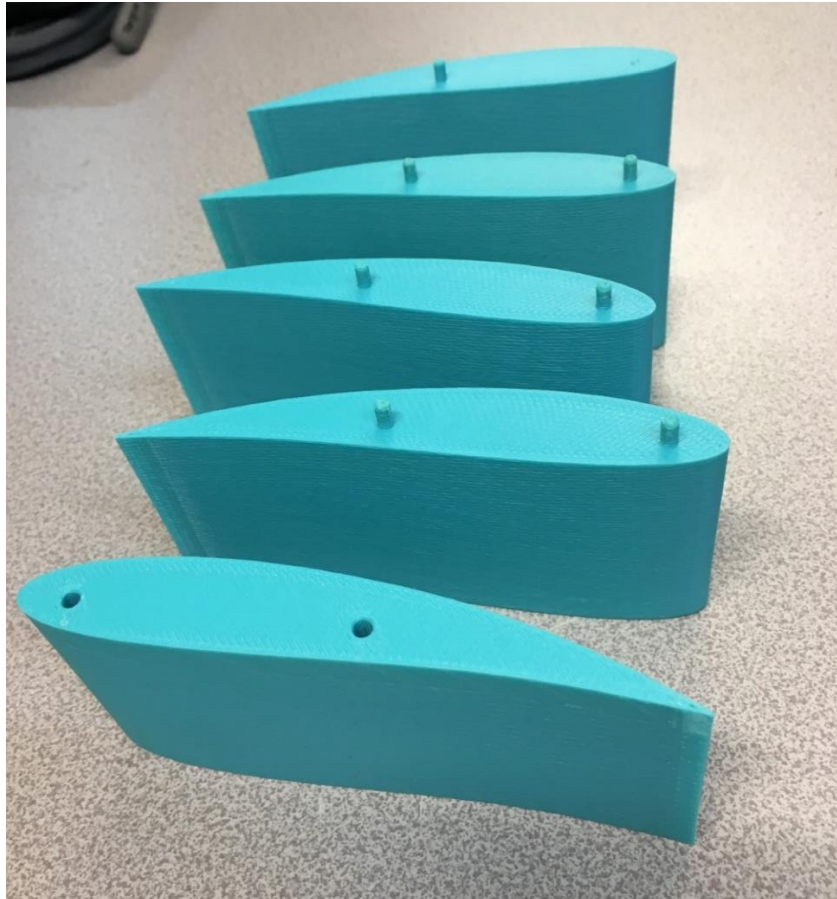


Figura 5.7. Impressió de la meitat de l'aleró davanter a escala 1/2.5 per parts. [Autor]

Un cop obtingudes totes les parts de l'aleró impreses realitzem l'assemblatge amb un adhesiu especial de dos components, seguint les instruccions d'aquest, després de l'aplicació deixem eixugar dues hores.



Figura 5.8. Material utilitzat per la realització dels models. [Autor]

Un cop obtingut els perfils amb totes les parts adherides procedim a fer un tractament superficial per disminuir la rugositat de la superfície de les peces. Aquest tractament superficial es basa en realitzar amb un bany de vapor de acetona.

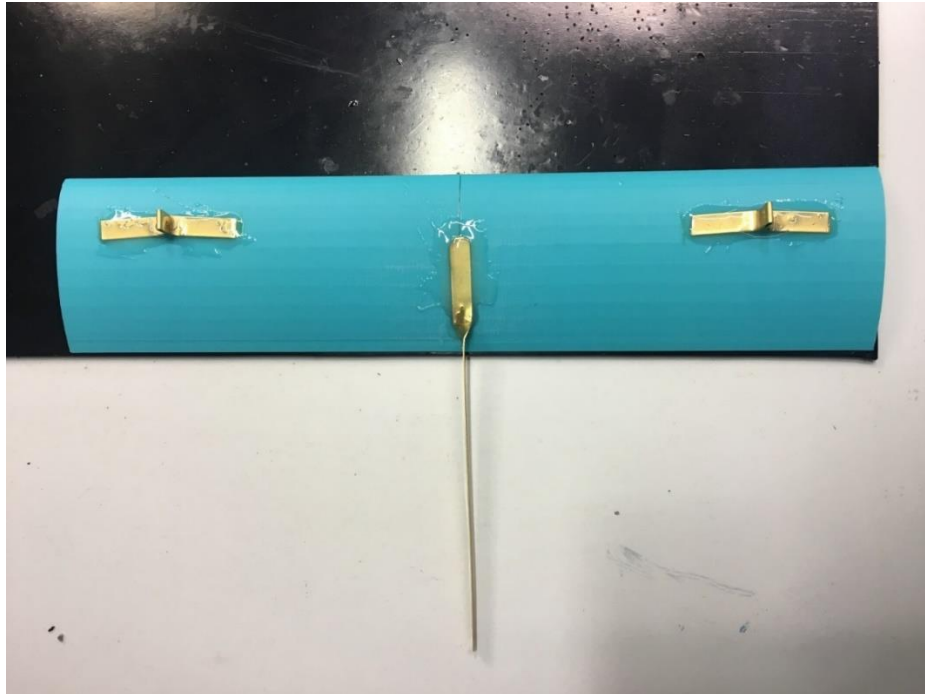


Figura 5.9. Perfil a escala 1/5. [Autor]

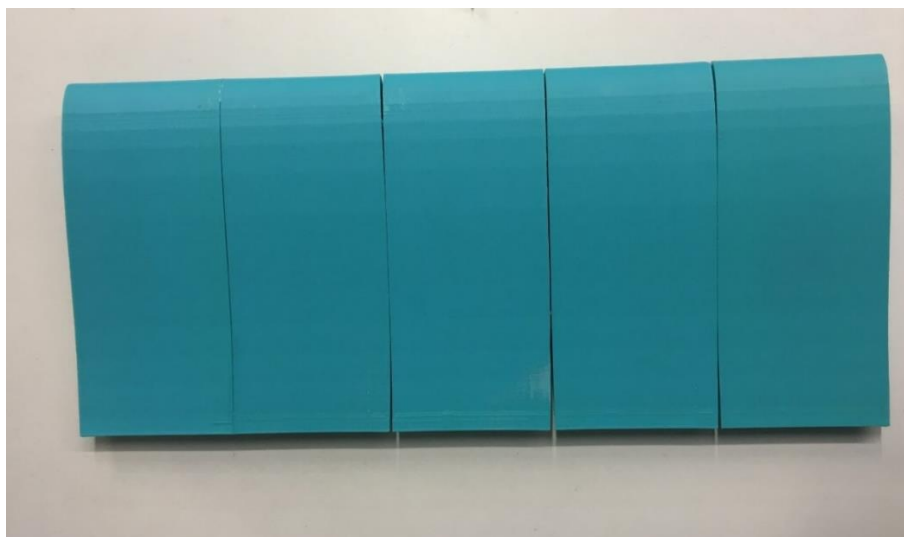


Figura 5.10. Assemblatge del perfil a escala 1/2.5 sense tractament superficial. [Autor]

En la figura 5.10 podem observar que quan hem realitzat l'assemblatge del perfil a escala 1/2.5, entre cada part del perfil no ha quedat perfectament unida, aquest fet es deu a un defecte d'impressió. Per resoldre el problema hem realitzat un post-processament a tot el perfil i finalment un tractament superficial.

Tractament superficial.

El vapor de acetona permet fondre parcialment la capa superior de les peces impreses amb ABS i quan es deixa eixugar la capa es torna llisa.

El mètode d'ús és posar algun tipus de material absorbent com per exemple paper a totes les vores d'un recipient i després introduir la peça que es vulgui tractar i tancar-lo hermèticament.



Figura 5.11. Preparació per realitzar el tractament superficial. [Autor]

El temps d'exposició de la peça al tractament varia depenent del seu volum, si el recipient està totalment hermètic i no pot sortir vapor d'acetona i si la peça té arestes amb poc material com en el nostre cas de l'aleró.

Després de realitzar algunes proves, (figura 5.11) vam poder determinar que per una peça d'aproximadament 100 grams amb especificacions del nostre aleró el temps de tractament és de 1h30m.

Punts de subjecció.

Un cop realitzat el tractament superficial vam haver de fer els suports necessaris per acollir l'aleró a les bàscules de la càmera d'assaigs del túnel.

Els punts de collada són tres, dos equidistants de 180 mm per els suports de les bàscules i un punt central per la regulació de l'angle d'atac.

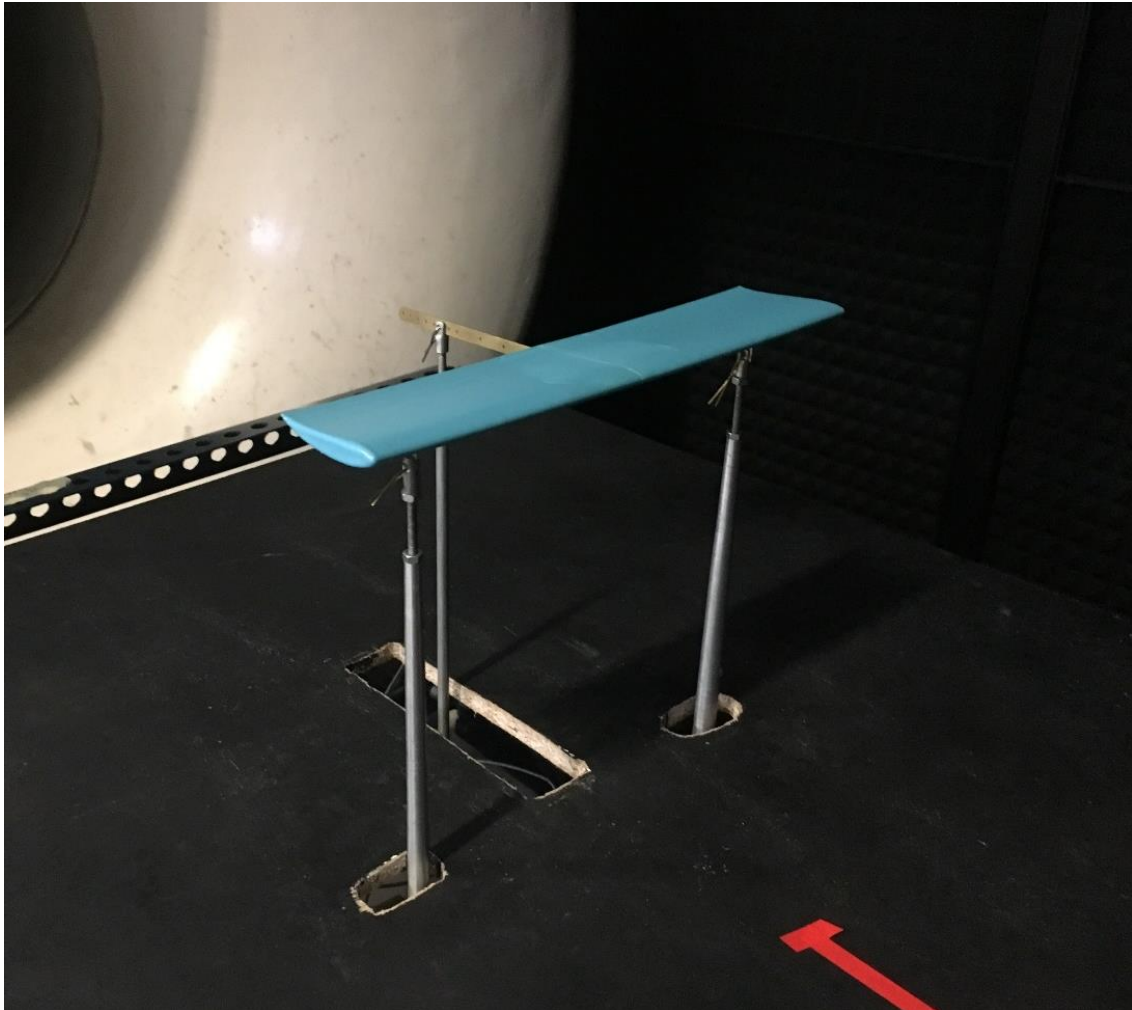


Figura 5.12. Vista general de l'aleró amb els punts d'acollada de la cambra d'assajos.
[Autor]



Figura 5.13. Vista de perfil de l'aleró amb els punts d'acollada de la cambra d'assajos.
[Autor]

Muntatge al túnel de vent.

Obtingut el model finalitzat amb tots els suports pertinents necessaris, procedim al muntatge a la càmera d'assaigs del túnel de vent. Es realitza la subjecció amb clips als suports de subjecció com podem veure en la figura 5.12, 5.13.

Els suports van sobre una taula mòbil que conté diferents bàscules per mesurar les càrregues aerodinàmiques.

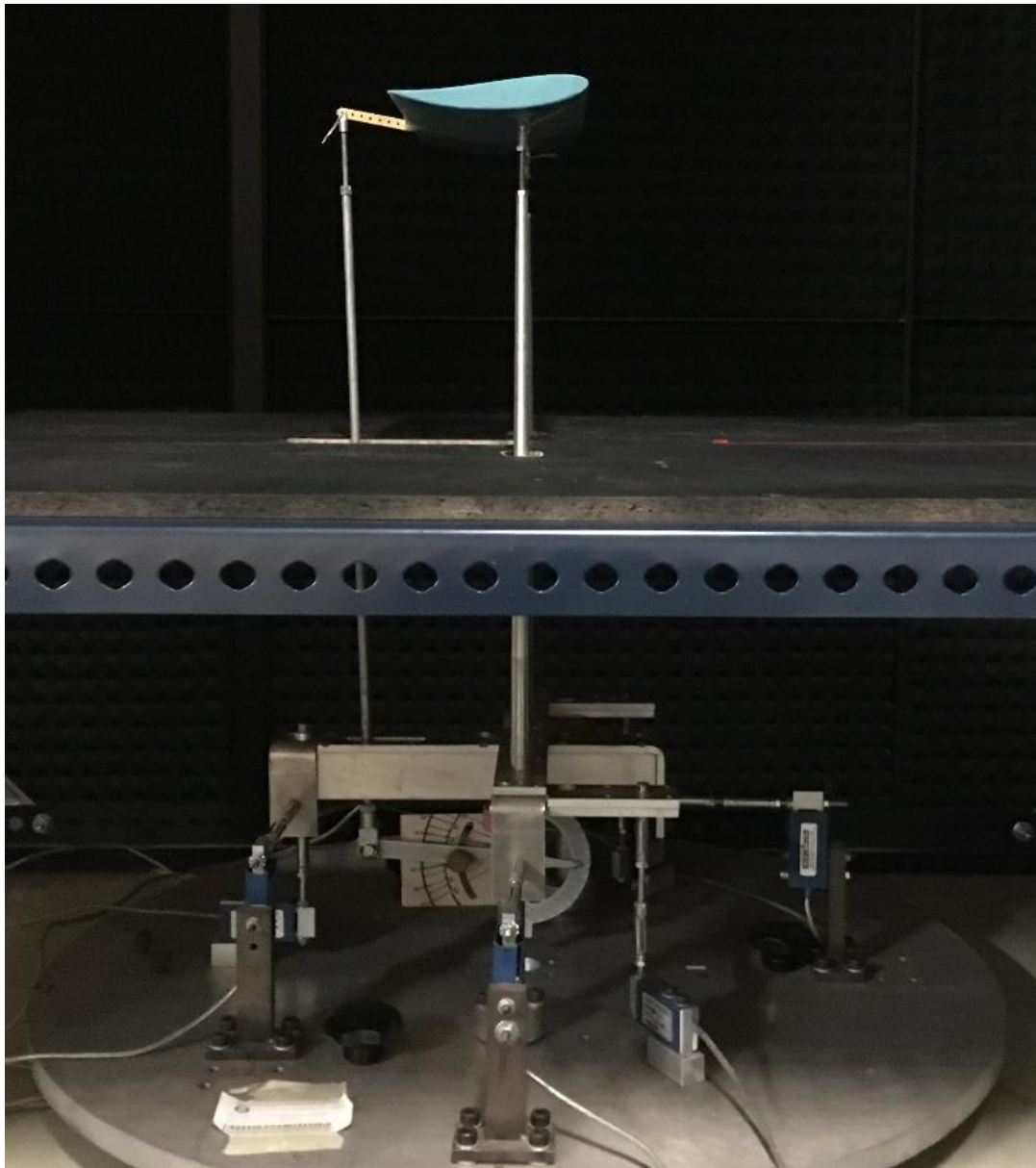


Figura 5.14. Vista de perfil de l'aleró amb els punts d'acollada a les bàscules. [Autor]

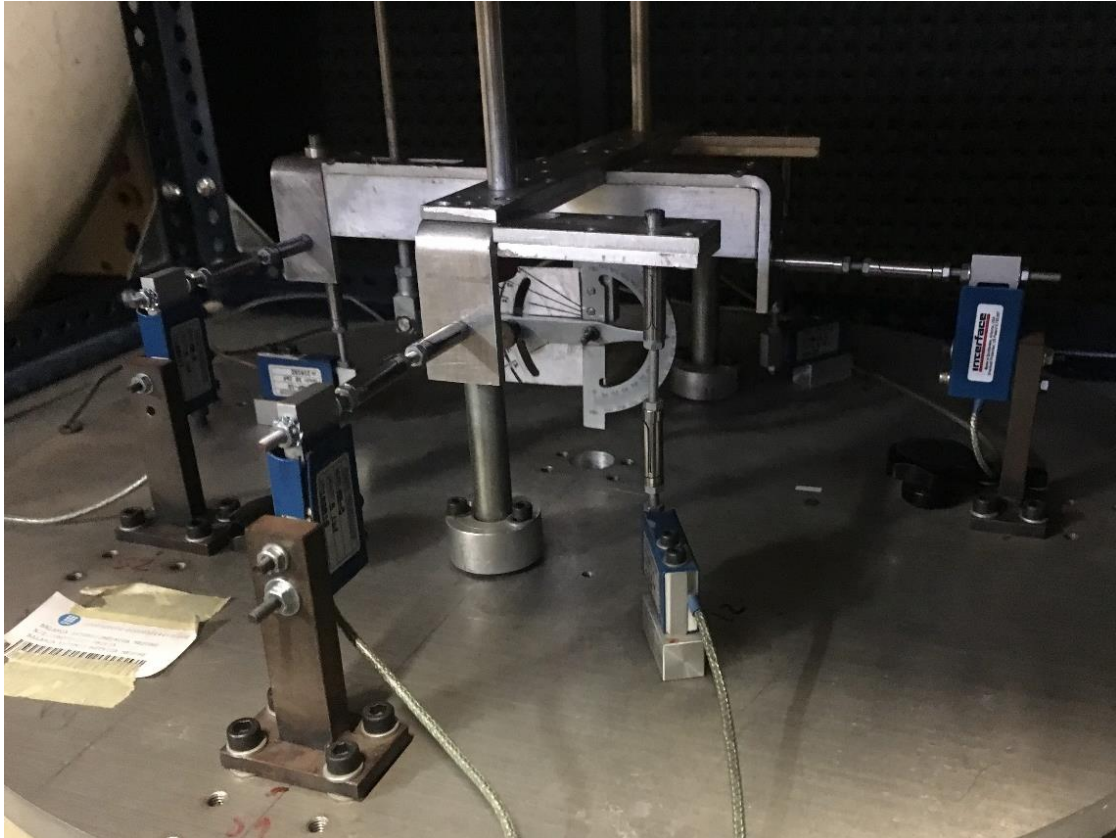


Figura 5.15. Detall de les bàscules utilitzades per la realització de l'assaig. [Autor]

5.3. Presa de dades

Per la presa de dades, considerant que ens trobaríem amb semblança restringida per a valors de velocitats superiors a 50km/h hem considerat fer l'assaig a una velocitat del fluid fixa de 31,4m/s que fou la màxima velocitat que hem pogut aconseguir amb el túnel de vent controlada a partir del mesurador digital de la figura 5.16.

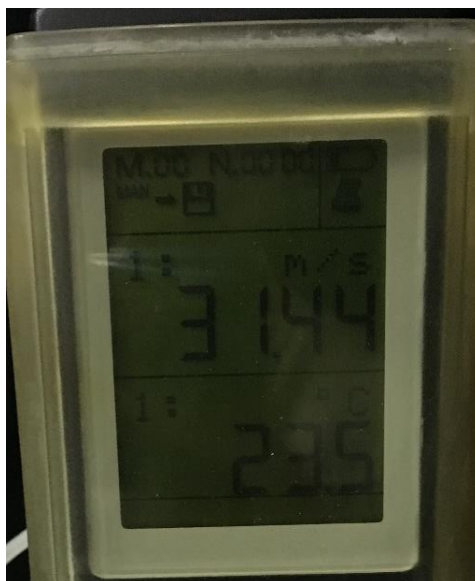


Figura 5.16. Captació de la velocitat del flux del túnel de vent. [Autor]

Seguidament hem pres les dades dels valors de les càrregues aerodinàmiques de sustentació i d'arrossegament i posteriorment hem obtingut els valors dels coeficients aerodinàmics.

Les dades ens venen a partir d'un programari específic del túnel de vent. Per la correcte utilització d'aquest i una bona presa de dades necessitem corregir i minimitzar els possibles errors que pugui tenir el sistema.

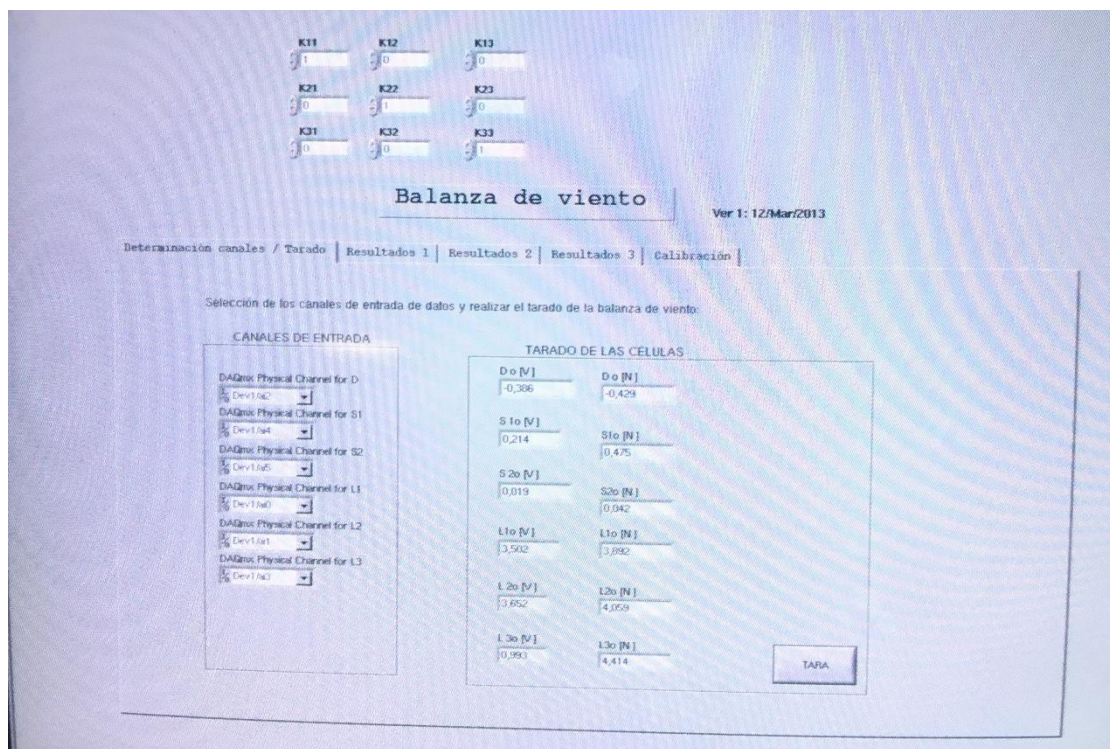


Figura 5.17. Calibratge de les bascules i creació de la matriu. [Autor]

Un cop realitzat el calibratge corresponent (figura 6.17), procedim a engegar el túnel de vent i obtenir els resultats que ens proporcionen les bàscules.

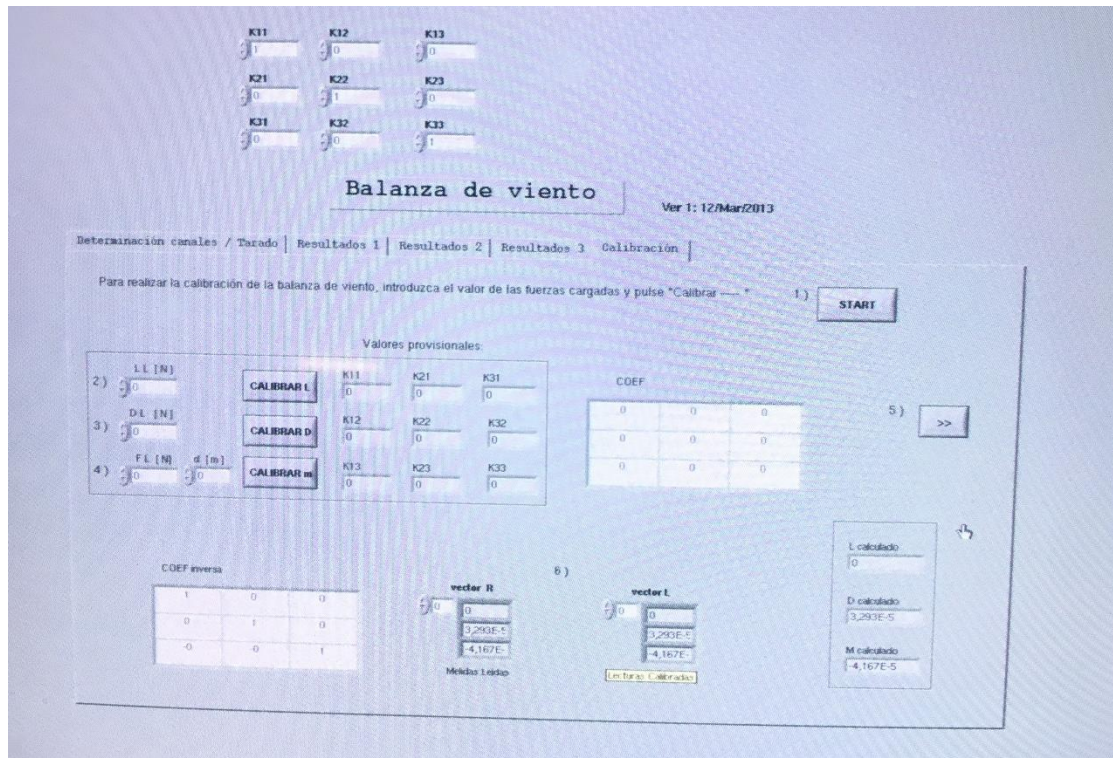


Figura 5.18. Taula de resultats un cop aplicada la matriu de correcció. [Autor]

Per obtenir aquests valors hem utilitzat el model a escala 1/5 amb un rang de valors d'angle d'atac entre 1 i 15° amb intervals de 1°.

Taula 5.3. Paràmetres de l'assaig.

Velocitat	31,4	m/s
Corda	0,056	m
Envergadura	0,25	m
Àrea planar	0,014	m ²
Densitat	1,204	kg/m ³

Respecte a la densitat, cal remarcar que la temperatura de l'aire es veu incrementada de 19°C a l'inici de la prova, fins a 23°C. Considerem mantenir la densitat en 1,204 Kg/m³, la mateixa amb la que hem realitzat els càlculs anteriors.

5.4. Resultats del túnel del vent.

Els resultats obtinguts de la simulació experimental en el túnel de vent les trobem a la taula 5.1 de l'Annex 2.

Per poder realitzar la comprovació de les forces i coeficients aerodinàmics de la simulació experimental respecte a la simulació numèrica ens centrem en la configuració de l'aleró davanter amb un angle d'atac de 4°.

Els resultats de l'assaig a aquesta configuració són:

- Aleró davanter original sense modificar
- Angle d'atac de 4°
- Velocitat del fluid de 31.4 m/s.
- Escala $\lambda=1/5$

Taula 5.4. Resultats obtinguts de la simulació experimental a partir del túnel de vent a l'angle d'atac de 4°.

	F_L (N)	F_D (N)	C_L	C_D
4°	4,23	3,04	0,5088	0,3659

Si fixem el valor del factor d'escala ($\lambda = 1/5$) i la velocitat màxima que hem pogut assolir en el túnel de vent.

$$v_p = v_m * \left(\frac{L_m}{L_p}\right) * \left(\frac{\vartheta_p}{\vartheta_m}\right)$$

$$v_p = 31.4 \frac{m}{s} * \left(\frac{0.25m}{1.25m}\right) * \left(\frac{\vartheta_p}{\vartheta_m}\right) \overset{1}{=} 6.28 \frac{m}{s} * \frac{1km}{1000m} * \frac{3600s}{1hr} = \boxed{22.6 \frac{km}{h}}$$

Com veiem el valor de la velocitat que podríem representar com a semblança perfecte seria de $v_p = 22.6 \frac{km}{h}$. A velocitat superiors ja entrariem en semblança restringida degut a la desigualtat de Reynolds entre model i prototipus.

Un cop obtinguda la velocitat que tindrem que aplicar al prototipus a l'estudi bidimensional i a la simulació numèrica per poder contrastar resultats amb els valors obtinguts en la simulació experimental, procedim a fer els pertinents estudis de comprovació.

6. SIMULACIÓ NUMÈRICA

En aquest apartat hem utilitzat la bibliografia [8], [10]

6.1. Introducció al software Siemens NX

Per realitzar les simulacions numèriques dels perfils del alerons utilitzarem el mètode CAD/CAE i CFD del programa Siemens NX.



Figura 6.1. Caràtula del Software Siemens NX. [Siemens NX]

Aquest programa com la majoria de softwares de simulació amb elements finits, el que fa per una banda, és simular el comportament de les tensions aplicades a la geometria i, el que fa, per altra banda, mitjançant el mòdul de simulació avançada l'estudi del comportament del fluid. Els resultats són extremadament extensos, donant moltes dades d'interès que podrem corroborar amb els nostres propis càlculs teòrics i comprovacions experimentals.

Primerament el que cal fer és modelar els objectes a estudiar, peça per peça amb l'opció de CAD, i un cop tenim totes les peces modelades procedim al seu assemblatge per obtenir els models finals que utilitzarem per l'estudi de fluid. Un cop obtinguts els resultats de l'estudi realitzat hem de post-processar-los. Aquesta fase final és en la qual recollirem les dades útils per introduir-les en el nostre projecte.

6.1.1. Configuració dels paràmetres del Siemens NX

Un cop realitzat l'estudi bidimensional i les simulacions experimentals hem obtinguts els valors dels coeficients i de les càrregues aerodinàmiques fem una comparació amb els paràmetres del Siemens NX per ajustar la resolució numèrica el més real possible.

Per determinar els paràmetres rellevants per aconseguir els resultats que esperem necessitem realitzar diferents proves d'assaig simulant les mateixes condicions en les quals també realitzarem la simulació experimental i comparar-los juntament.

Estudi de l'aleró davanter amb les condicions del túnel de vent.

A partir de les limitacions i la semblança (resolució en l'apartat 5.2.1.1 Estudi de semblança) i les dimensions del model determinen les dimensions del túnel com a prototipus.

Les limitacions del túnel són:

- Àrea d'assaig de 500mm de diàmetres
- Àrea de bloqueig màx. 10% de l'àrea total.
- Longitud màxima d'envergadura del model: 250mm

Característiques de l'aleró real:

- Corda: 280mm
- Envergadura: 1250mm
- Àrea planar : 350000mm²

Factor d'escala:

$$\lambda = \frac{L_m}{L_p} = \frac{250}{1250} = \frac{1}{5}$$

Característiques del model elegit:

- Corda: 56 mm
- Envergadura: 250 mm
- Àrea planar: 14000 mm²
- Àrea bloqueig: 2250 mm²

Característiques de les dimensions de la simulació del túnel de vent real:

$$\lambda = \frac{D_{tunnel\ model}}{D_{tunnel\ prototipus}} = \frac{500}{D_{tunnel\ prototipus}} = \frac{1}{5}$$

$$D_{tunnel\ prototipus} = \frac{D_{tunnel\ model}}{\lambda} = \frac{500}{\frac{1}{5}} = \boxed{2500\ mm}$$

$$\text{La longitud del túnel agafem: } L_{tunnel\ prototipus} = \frac{\frac{1250}{1}}{\frac{1}{5}} = 6250\ mm$$

Procediment.

Obtingut el model procedim a realitzar la simulació.

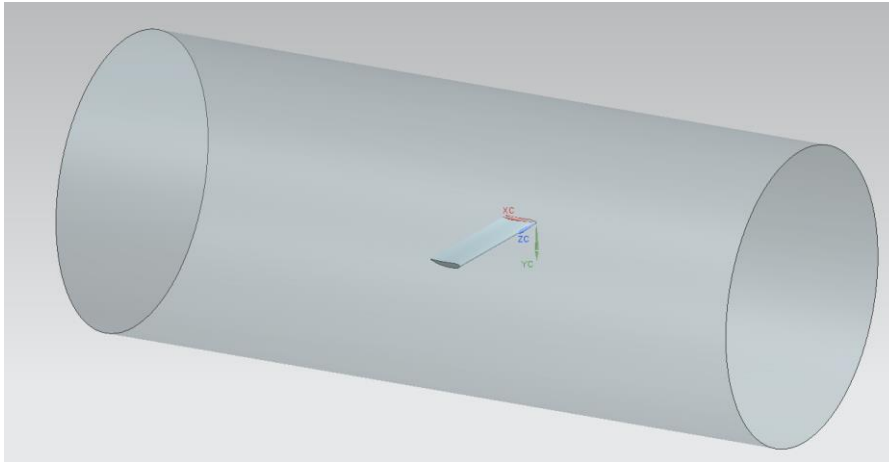


Figura 6.2. Bloc d'aire del túnel de vent. [Siemens NX]

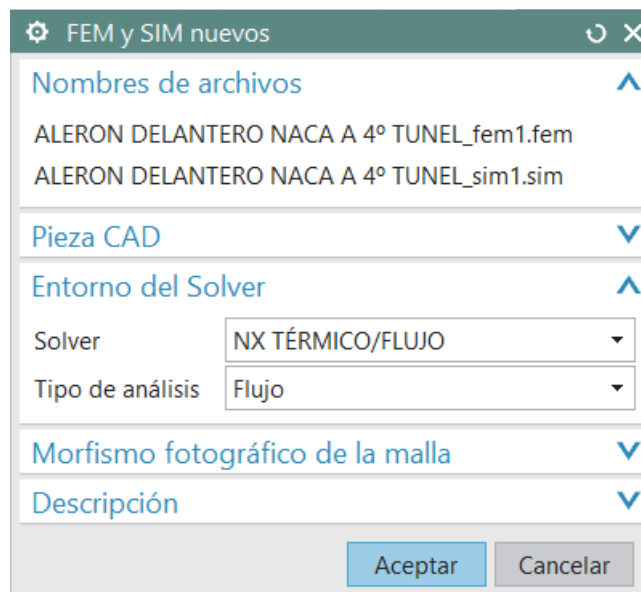


Figura 6.3. Creació dels arxius FEM i SIM. [Siemens NX]

Antes de realitzar el mallat 3D del volum necessitem assignar el material, en aquest cas aire.

Realitzem un primer mallat amb dimensió de 20 mm i observem la distribucions del nodes.

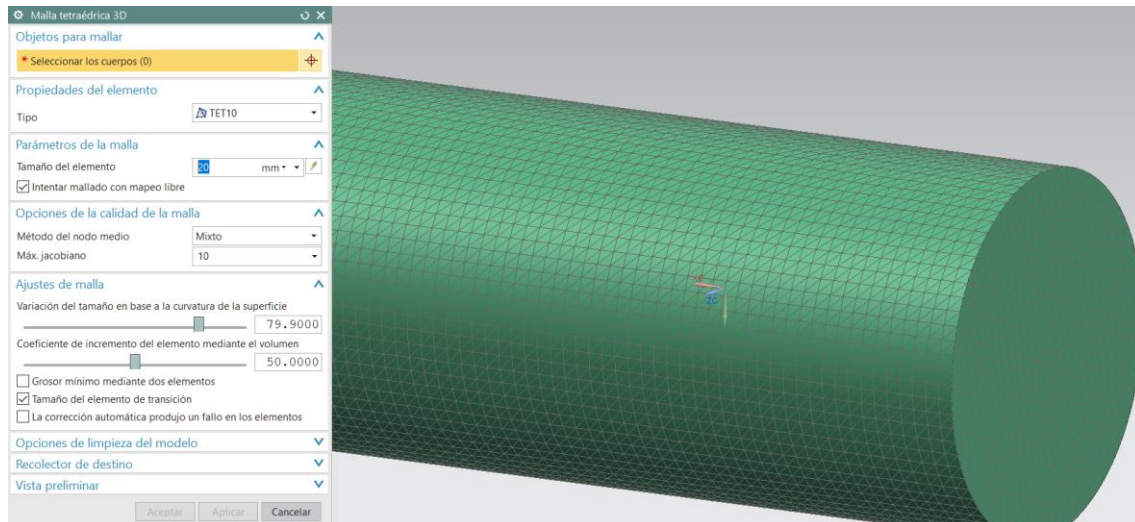


Figura 6.4. Malla tetraèdrica “TET10” amb mesura de l’element de 20 mm. [Siemens NX]

Observem (figura 6.4) que es crea un mallat totalment regular que ens serveix per determinar amb més exactitud les càrregues aerodinàmiques i velocitats que es produiran en el túnel de vent.

Seguidament necessitem incrementar la precisió sobre el perfil i ens decantem per l’opció del “control de malla”. Aplicant un control de la mesura de la cara de 5 mm seleccionant tot el perfil de l’aleró com veiem en la figura 6.5.

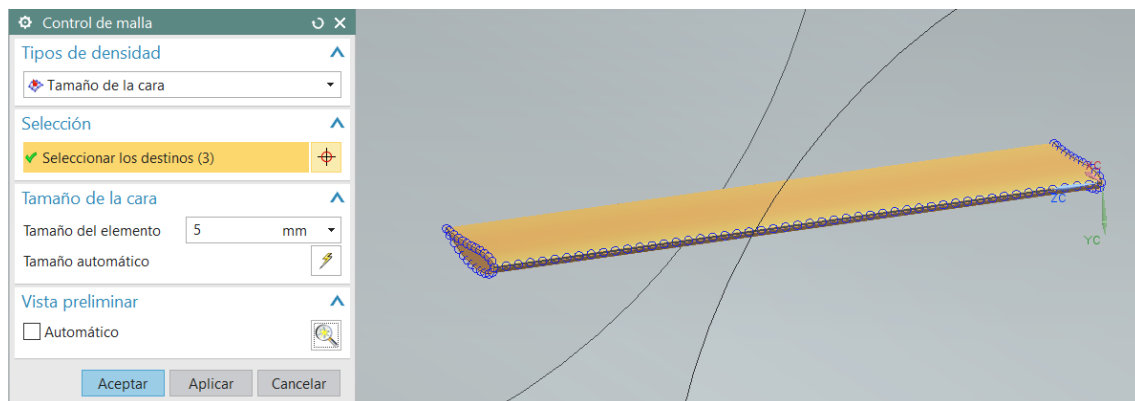


Figura 6.5. Aplicació de “control de malla”. [Siemens NX]

Un cop realitzat la malla ens centrem amb l’arxiu “SIM” per determinar les condicions de contorn.

En primer lloc determinem el flux d’entrada i la seva velocitat. (figura 6.6)

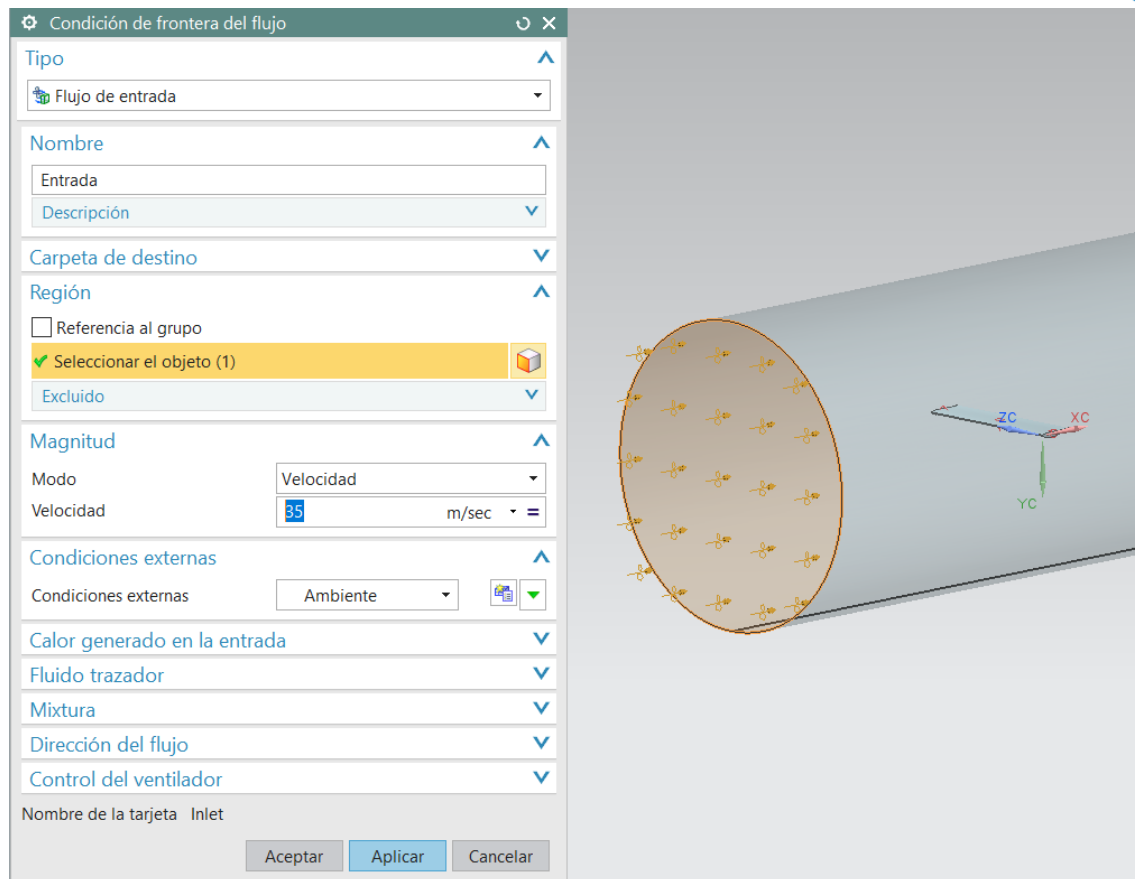


Figura 6.6. Determinació del flux d'entrada. [Siemens NX]

La sortida la considerem com una "obertura" a l'atmosfera. (figura 6.7)

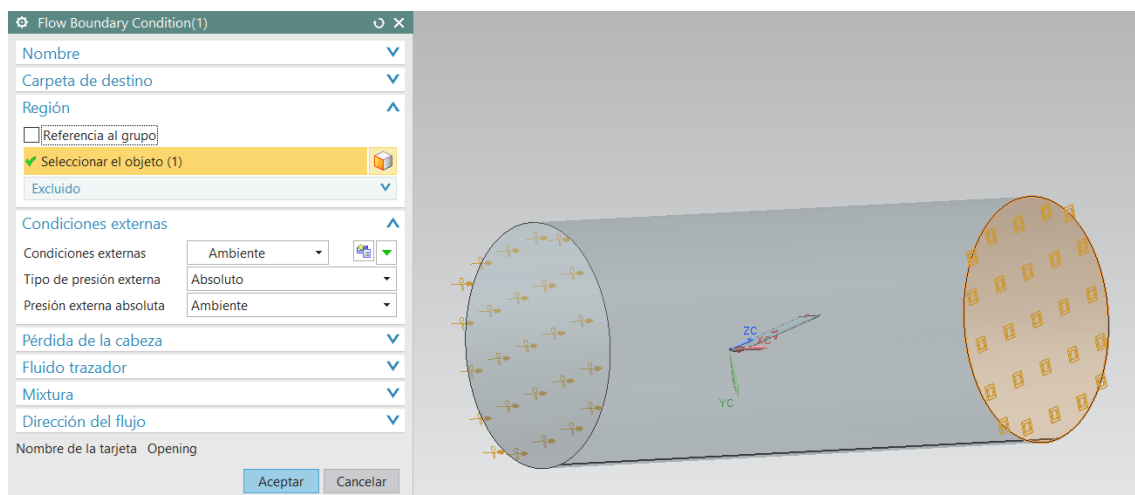


Figura 6.7. Obertura a atmosfera. [Siemens NX]

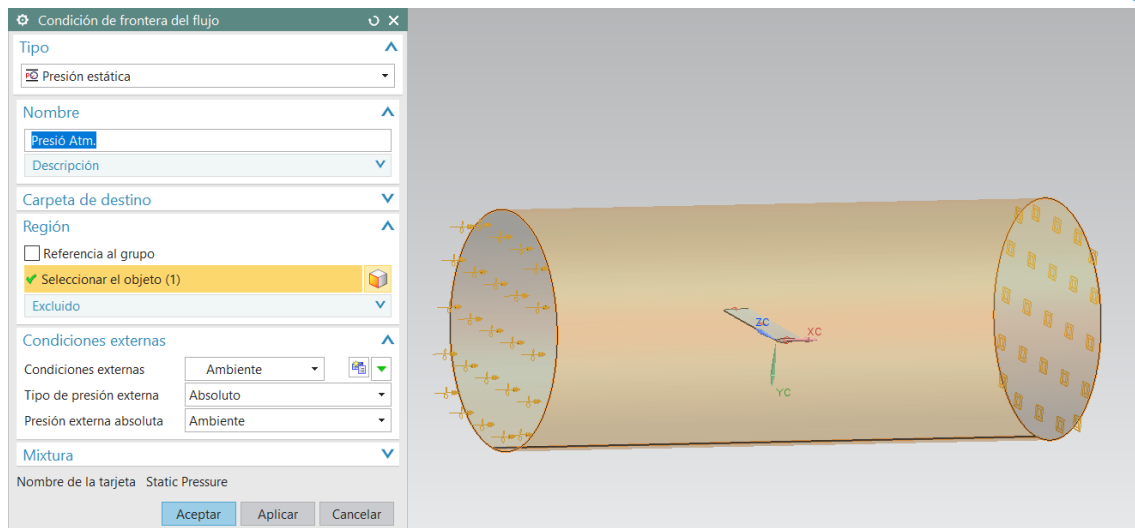


Figura 6.8. Condició de frontera a pressió atmosfèrica. [Siemens NX]

Per determinar els coeficients i les forces aerodinàmiques utilitzem l'opció d'obtenir un informe específic per aquesta finalitat. En ell haurem d'introduir les dades rellevants, que són:

- L'àrea planar : 14000 mm^2
- La corda: 56 mm
- La velocitat del flux: 35 m/s
- I la densitat: 1.204 kg/m^3

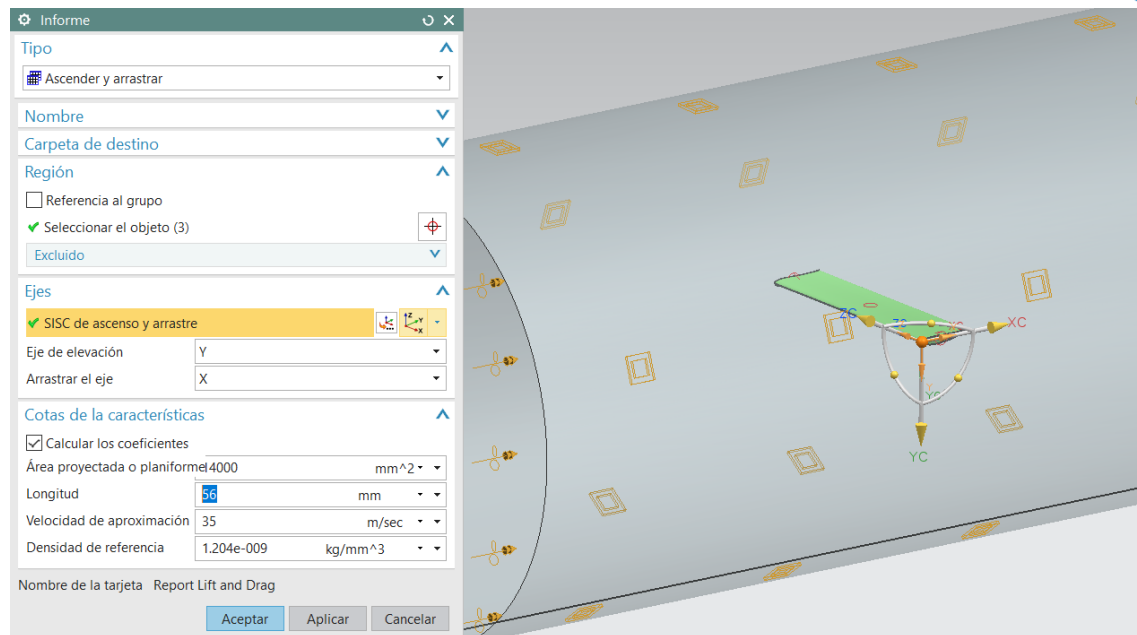


Figura 6.9. Informe de les càrregues aerodinàmiques. [Siemens NX]

Quan ja tenim totes les condicions de contorn determinades, procedim a determinar les condicions de la solució.

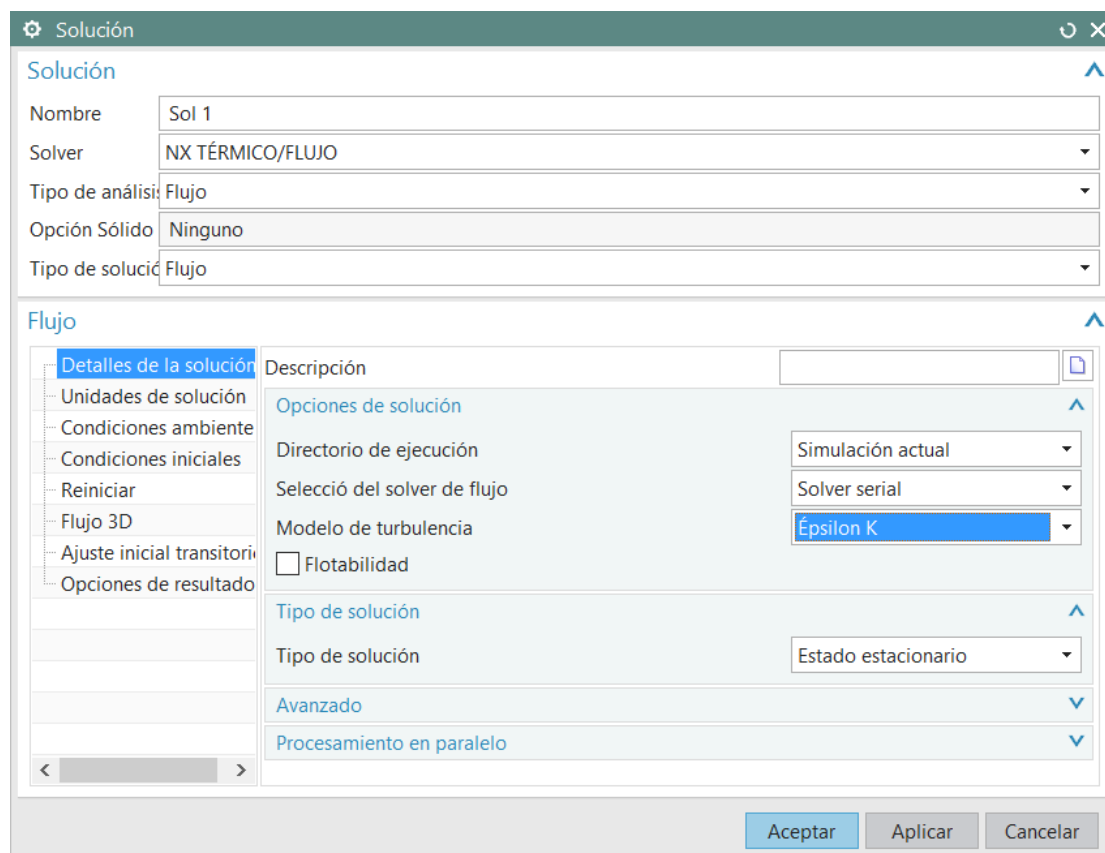


Figura 6.10. Detalls de la solució. [Siemens NX]

Una altra adaptació del paràmetres de la solució que s'utilitza quan es considera un flux constant o estacionari, (figura 6.10) el qual no canvia mentre avança a través del cos ni es veu afectat per forces externes, és la utilització del model de turbulència "Épsilon-k"

Citant la tesina de Jacob Dazaruela (2010) [8]:

"La correcta representación de estos flujos en el análisis CFD resulta clave, para ello modelo "k-epsilon" se utiliza en general con bastante éxito en las aplicaciones de ingeniería. Sin embargo, este modelo de turbulencia no predice con exactitud la separación de puntos tanto como algunas veces se requiere".

"Siemens NX cuenta con el modelo Viscosidad Turbulencia Fija que simplifica las ecuaciones y resulta muy adecuado para las primeras simulaciones, previas a la utilización del modelo (k-epsilon)".

En definitiva així com exposa la tesina, realitzarem una primera simulació amb el model de "Viscosidad Turbulencia Fija" i si els resultats sobre el mallat són correctes, posteriorment aplicarem el model "Épsilon-k"

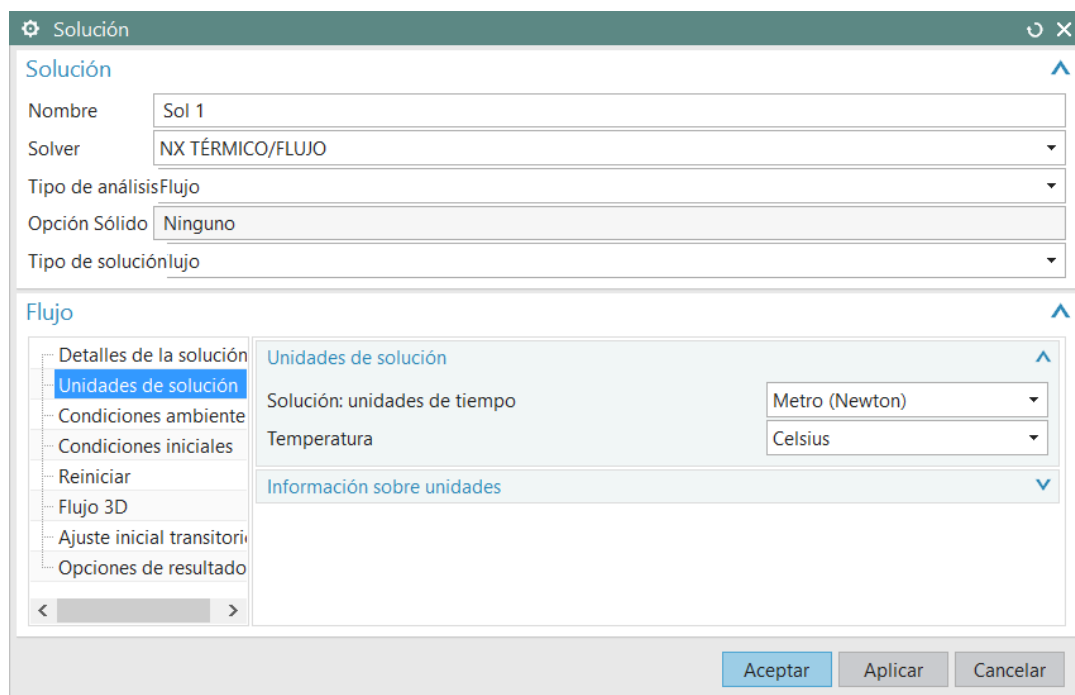


Figura 6.11. Unitats de la solució. [Siemens NX]

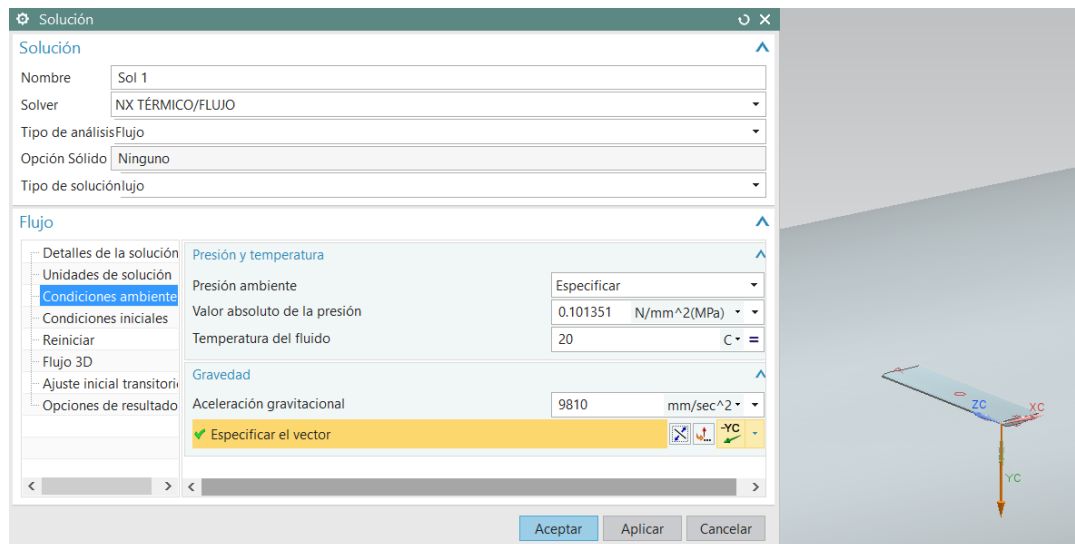


Figura 6.12. Condiciones ambient [Siemens NX]

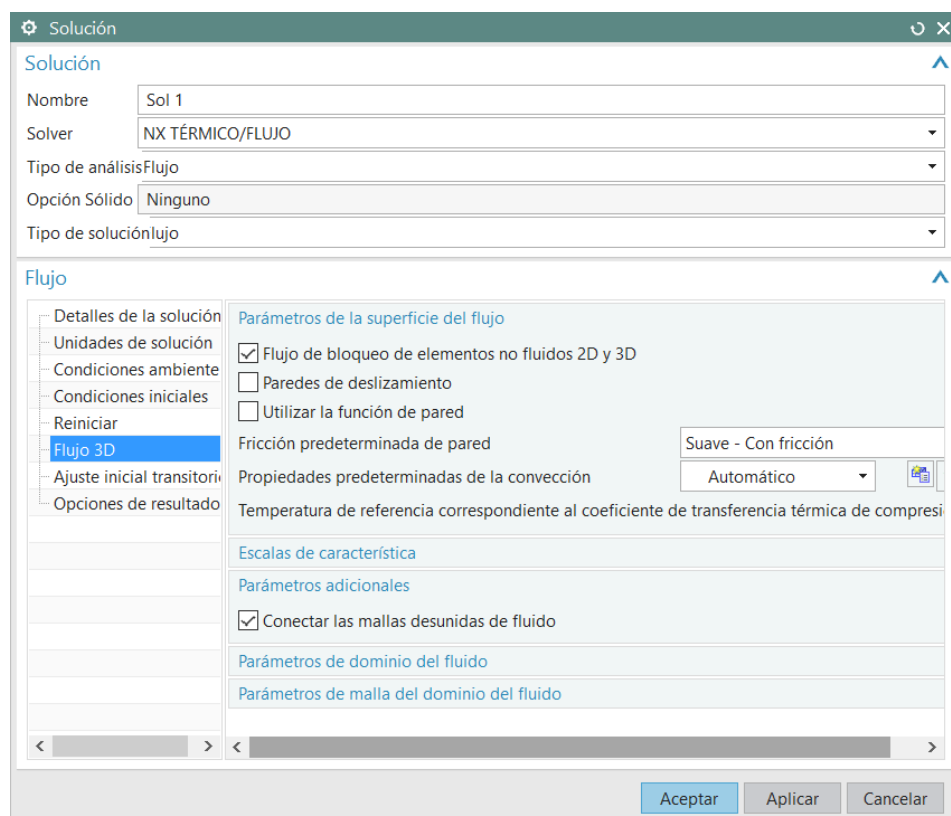


Figura 6.13. Flux 3D [Siemens NX]

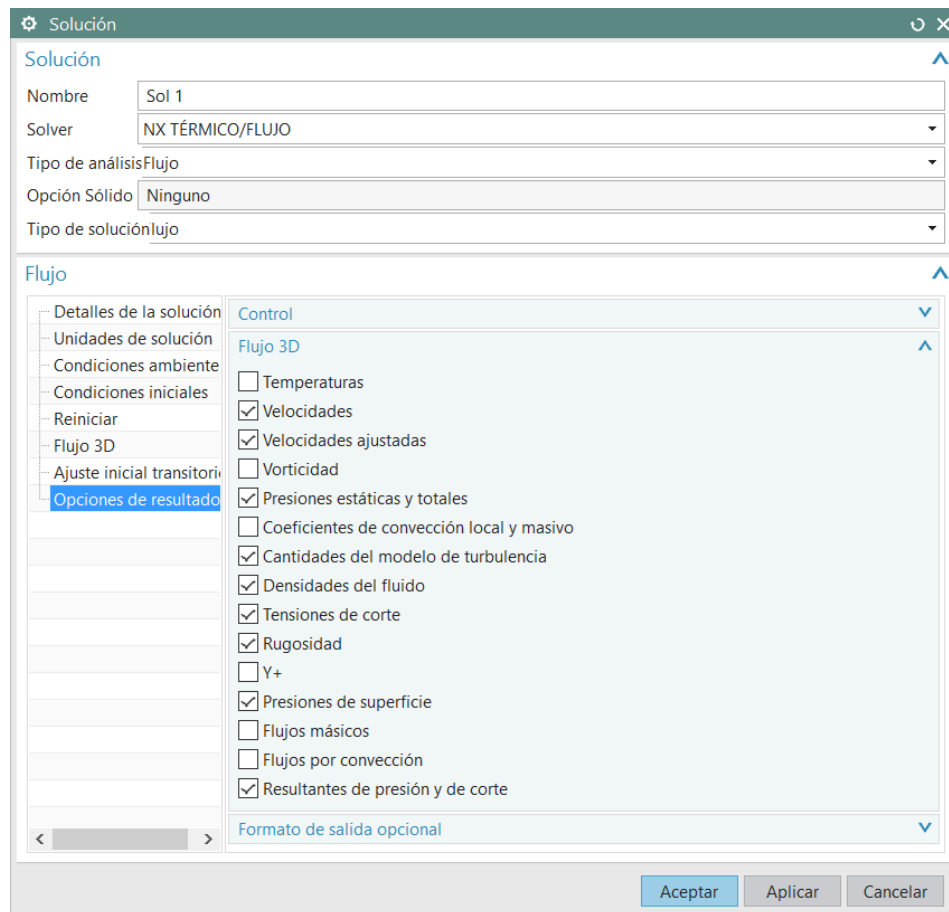


Figura 6.14. Opcions del resultat. [Siemens NX]

En aquest últim punt (figura 6.14) és orientatiu ja que les opcions del resultat poden variar segons les especificacions del que estem cercant.

Referent als paràmetres del "solver" les deixem per defecte (figures 6.15, 6.16, 6.17, 6.18) i resoltem.

Parámetros del Solver

Solver

NX THERMAL / FLOW

Parámetros

Versión del Solver

Número de la versión 10.0.112, Nov 05 2014

Solver térmico

Solver del flujo 3D

Solver acoplado

Parámetros de radiación

Control de convergencia

Estado estacionario: Relajación en el paso temporal Físico

Paso temporal 0.5 sec

Criterios de convergencia

Restos RMS 0.0002

☐ Opción de fracción de desequilibrio del flujo global

☐ Opción Fracción global de desequilibrio térmico

Estado estacionario: Límite de la iteración 1000

Transitorio: Límite de la iteración 100

Campo Congelar el flujo en la convergencia correspondiente al estado estacionario

☐ Campo Congelar el flujo en la convergencia

Campo Congelar el flujo correspondiente al estado transitorio

☐ Campo Congelar el flujo basado en la evolución de la solución

☐ Campo Congelar el flujo en las horas especificadas

Factores de relajación

Global 0.75

Masa 0.75

Fluidos 0.9

Turbulencia 1

Resistencia de la pantalla 0.25

Curvas del ventilador (E/S de ventiladores internos) 1

Curvas del ventilador (ventiladores de recirculación) 1

Figura 6.15. Paràmetres del “solver” 1. [Siemens NX]

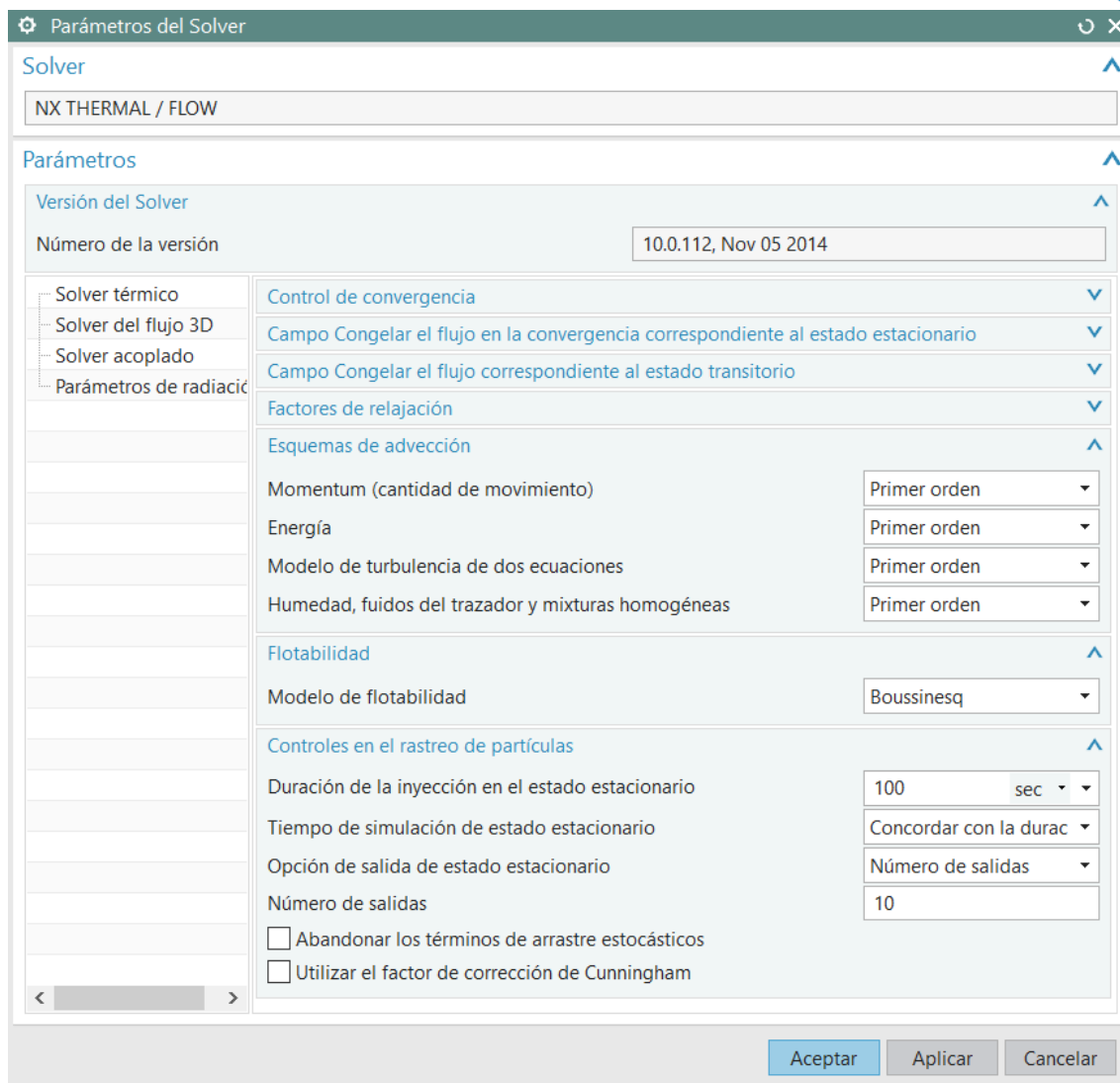


Figura 6.16. Paràmetres del “solver” 2. [Siemens NX]



Figura 6.17. Paràmetres del “solver” 3. [Siemens NX]

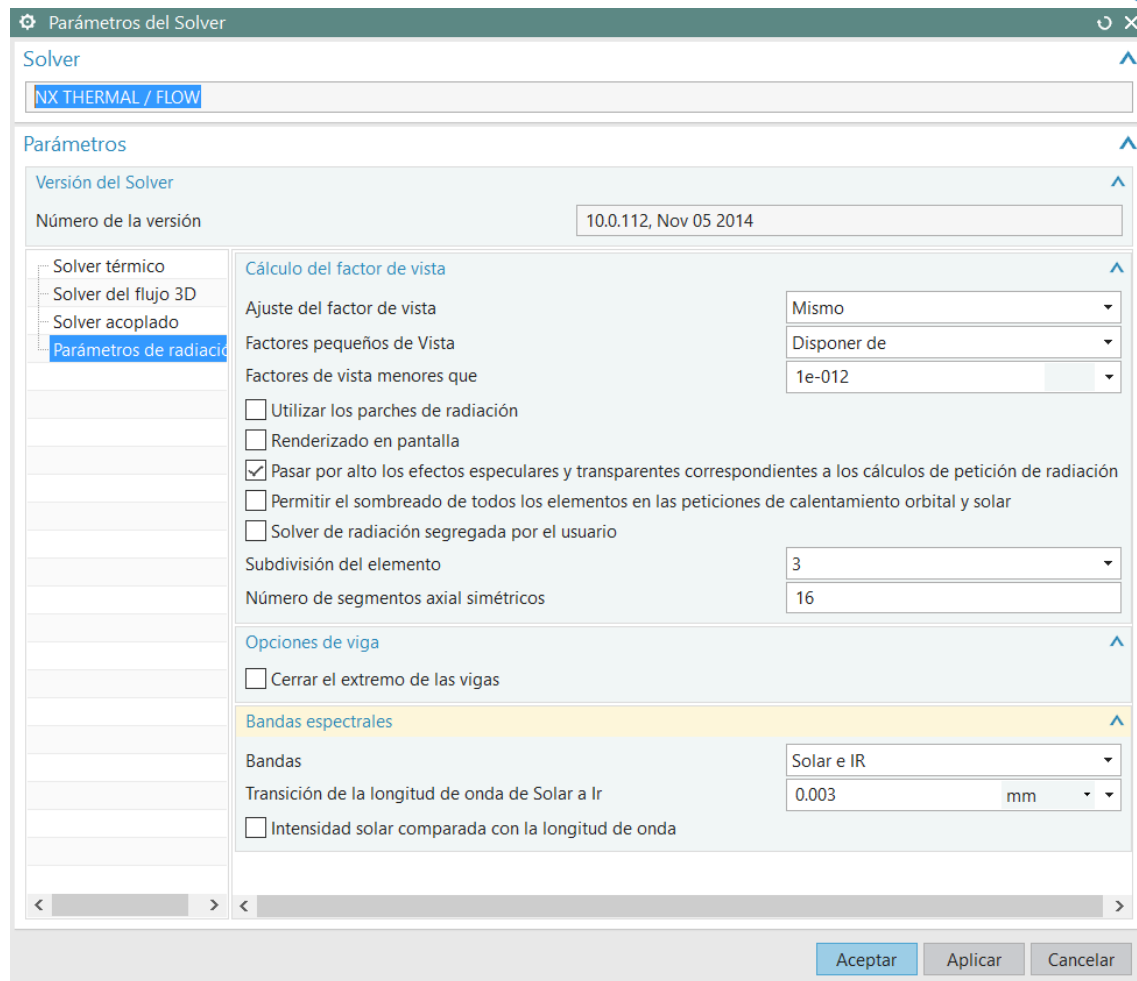


Figura 6.18. Paràmetres del “solver” 4. [Siemens NX]

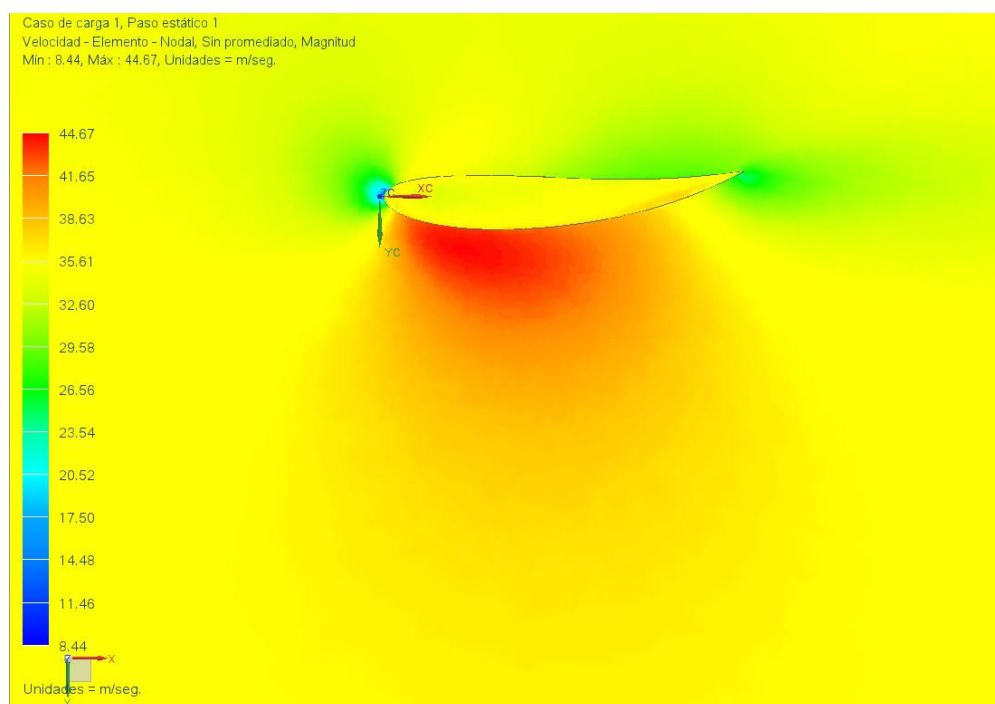


Figura 6.19. Velocitats aleró davanter. [Siemens NX]

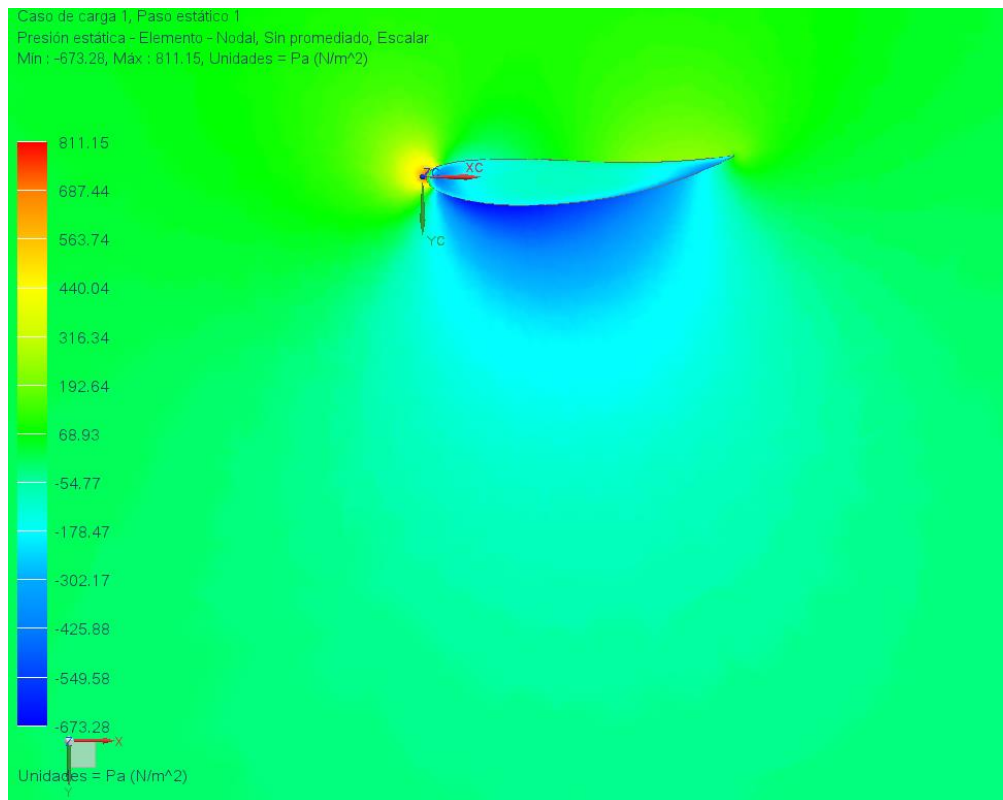


Figura 6.20. Pressió a l'aleró davanter. [Siemens NX]

6.2. Estudi previ dels alerons

Un cop determinats tots els paràmetres per realitzar la simulació numèrica amb el programa Siemens NX procedim a fer l'estudi tridimensional.

6.2.1. Aleró davanter

A partir de l'assemblatge de l'aleró davanter apliquem els paràmetres rellevants del "solver" del software Siemens NX determinats anteriorment.

Mallat del perfil

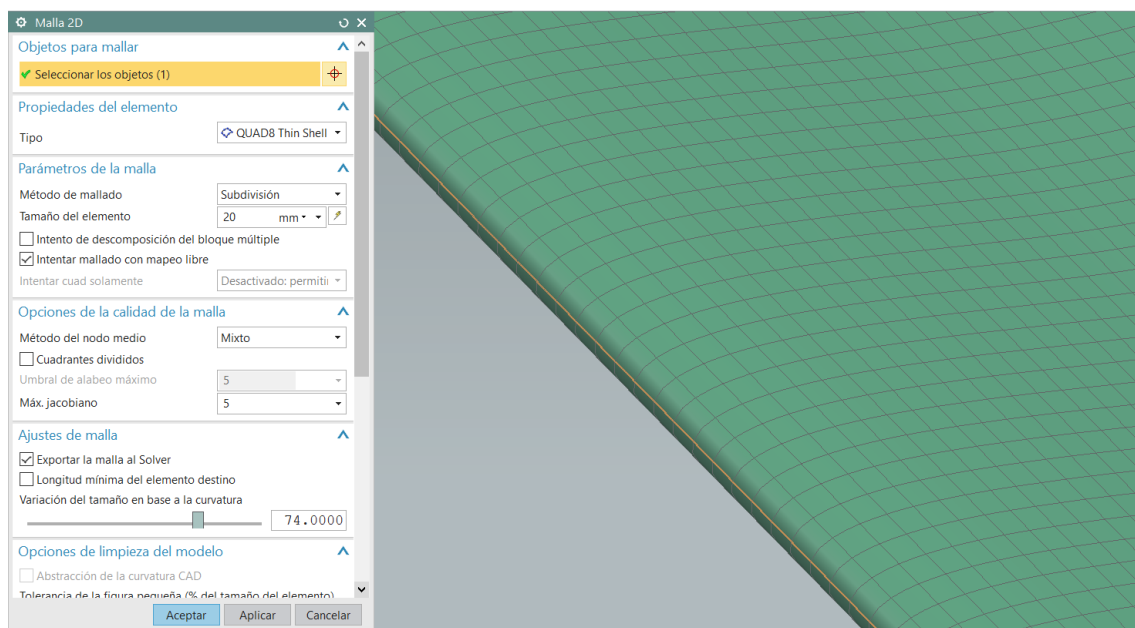


Figura 6.21. Malla 2D utilitzada en l'aleró davanter. [Siemens NX]

Després de realitzar diversos mallats per l'aleró davanter hem escollit el tipus de malla "QUAD8 Thin Shell" (figura 6.21) amb un nombre de subdivisió de 20mm perquè ens determina un mallat correcte i uniforme.

La peculiaritat del "QUAD8" és que trobem punts entremitjos entre els extrems de l'element creant l'element a partir de 4 vèrtex més 4 punts entremig.

Un cop tenim el mallat 2D de la superfície d'estudi de l'aleró davanter, passem al mòdul de simulació per determinar les condicions de contorn i la malla del fluid; en aquest cas serà aire.

Simulació

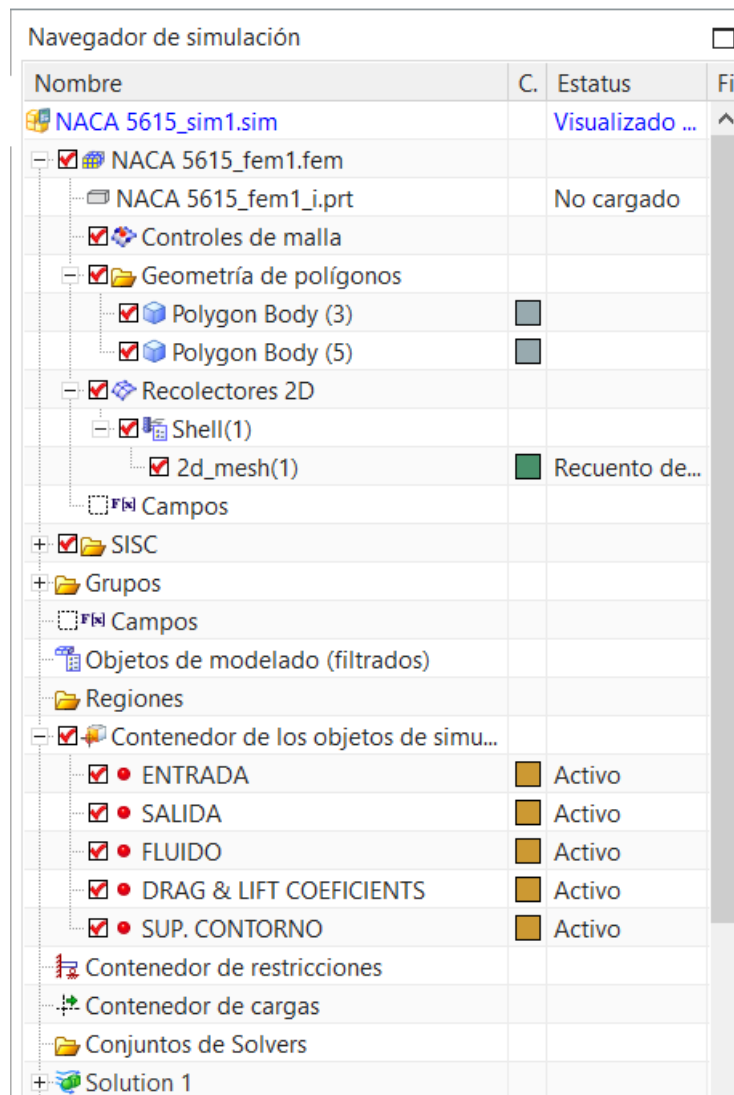


Figura 6.22. Condicions de contorn necessàries per realitzar la simulació.
[Siemens NX]

Com veiem en la figura 6.22, necessitem determinar una entrada del flux en la que introduïrem la velocitat d'estudi, una sortida a pressió atmosfèrica tot i que a nivell d'estudi experimental en el túnel de vent, la pressió serà superior a l'atmosfèrica. Per altra banda determinarem la malla de fluid, en aquest cas aire, la malla de la superfície de fluid a estudiar, que serà la superfície mallada en 2D anteriorment, determinarem les subdivisions en 10mm i crearem una capa límit per obtenir els resultats els més reals possibles.

Per últim com a punt opcional podem determinar que el programa ens calculi directament els coeficients de sustentació i d'arrossegament introduint els paràmetres rellevants que són l'àrea planar, la longitud de corda, la velocitat del flux i la densitat a l'informe de "ascendir y arrastrar".

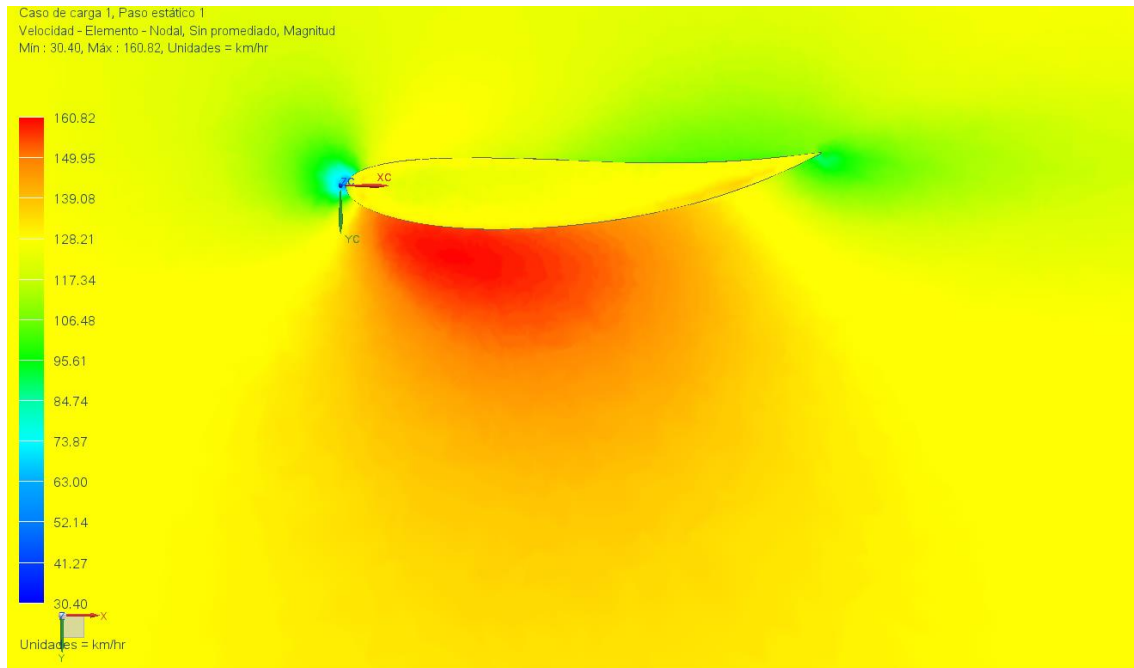


Figura 6.23. Velocitats absolutes a través de l'aleró davanter. [Siemens NX]

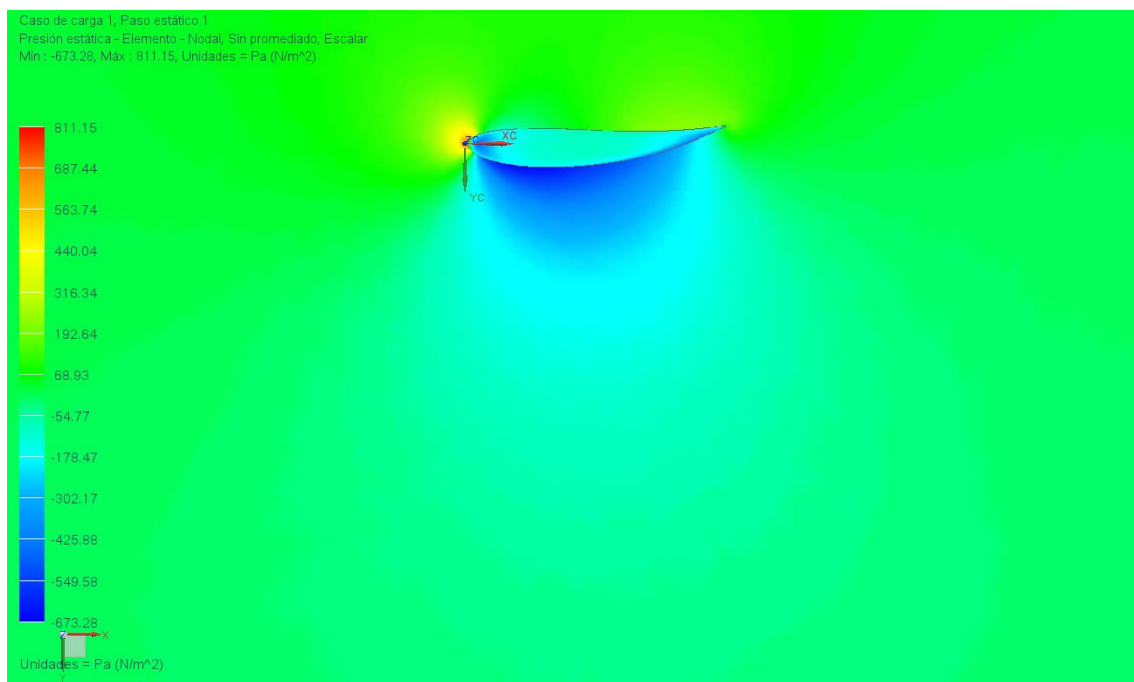


Figura 6.24. Increment de pressió relativa a l'aleró davanter. [Siemens NX]

En la figura 6.23 es pot observar com varia la velocitat del fluid al llarg del perfil realitzant l'estudi a 130km/h, la velocitat s'incrementa fins a 160.82 km/h en la zona inferior del perfil. En la figura 6.24 observem les pressions relatives a través del l'aleró creant una pressió màxima de 811.15 Pa en la punta d'atac i una pressió mínima de -673.28 Pa en la part inferior del perfil.

Taula 6.1. Resum dels resultats 3D de l'aleró davanter amb angle d'atac de 4°.

Velocitat (km/h)	Mach	Reynolds	C_L/C_D	C_L	C_D	F_L (N)	F_D (N)
60	0,049	309050,77	5,59	0,655	0,1171	38,34	6,85
70	0,057	360559,23	5,62	0,656	0,1168	52,26	9,30
80	0,065	412067,70	5,63	0,657	0,1167	68,36	12,14
90	0,073	463576,16	5,66	0,659	0,1165	86,78	15,34
100	0,082	515084,62	5,67	0,66	0,1164	107,30	18,92
110	0,090	566593,08	5,68	0,661	0,1163	130,03	22,88
120	0,098	618101,55	5,70	0,662	0,1162	154,98	27,20
130	0,106	669610,01	5,71	0,663	0,1162	182,16	31,93
140	0,114	721118,47	5,72	0,664	0,1161	211,58	37,00
150	0,122	772626,93	5,75	0,666	0,1158	243,62	42,36
160	0,131	824135,39	5,77	0,668	0,1157	278,02	48,15
170	0,139	875643,86	5,78	0,668	0,1155	313,86	54,27
180	0,147	927152,32	5,82	0,669	0,115	352,40	60,58

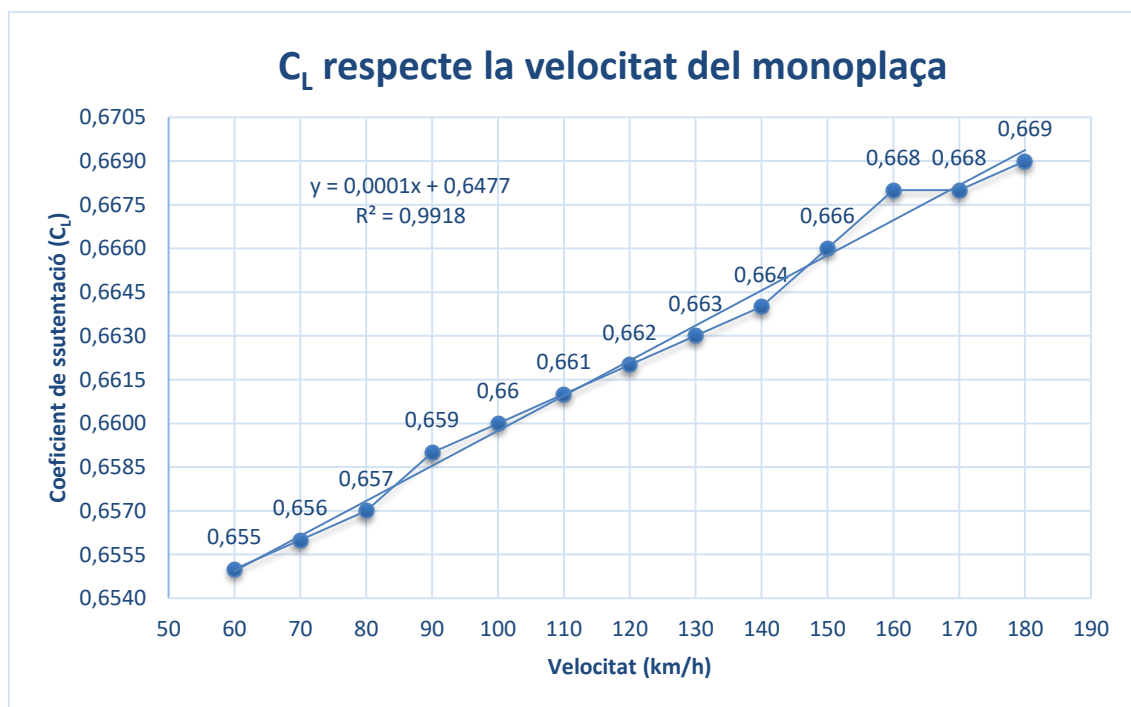


Figura 6.25. Tendència del coeficient d'anti-sustentació 3D (C_L) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

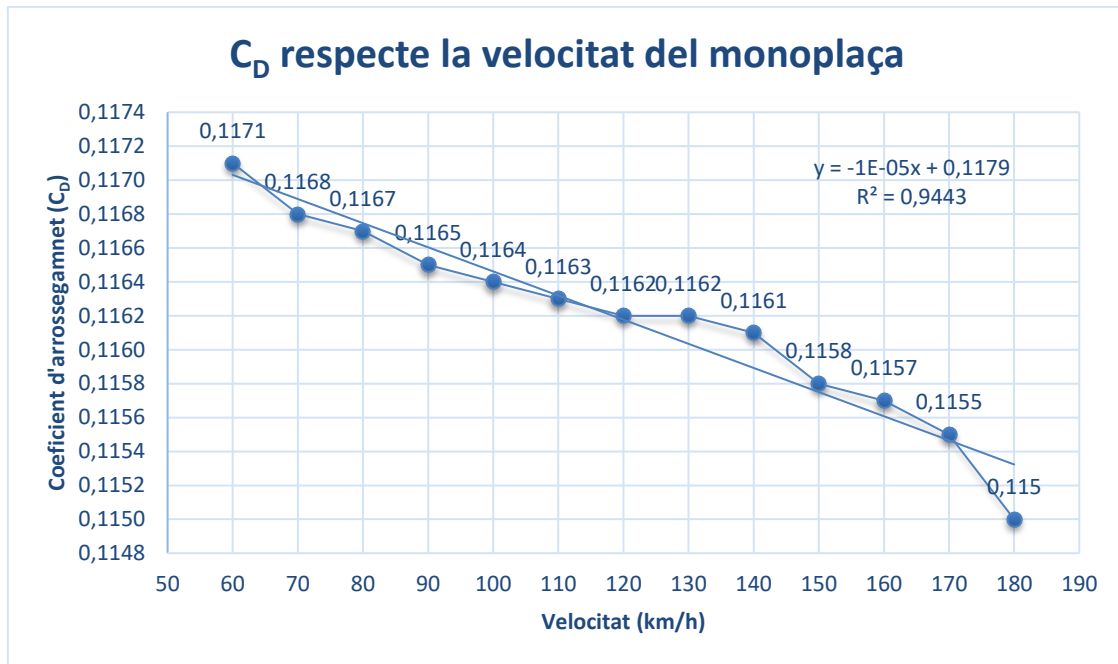


Figura 6.26. Tendència del coeficient d'arrossegament 3D (C_D) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

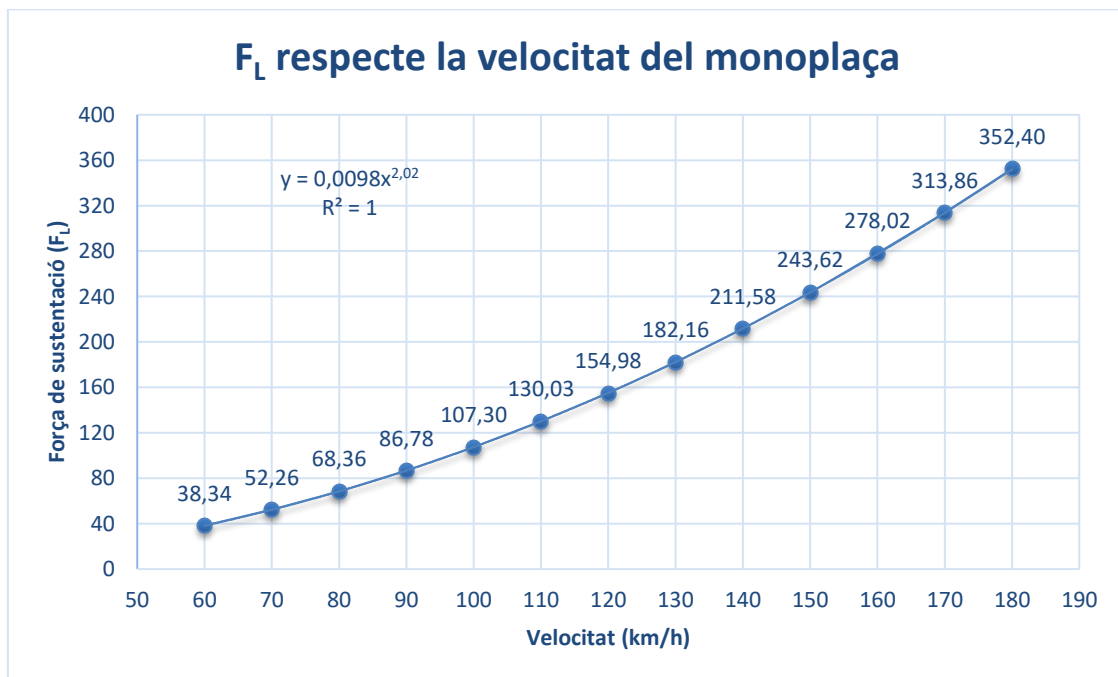


Figura 6.27. Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

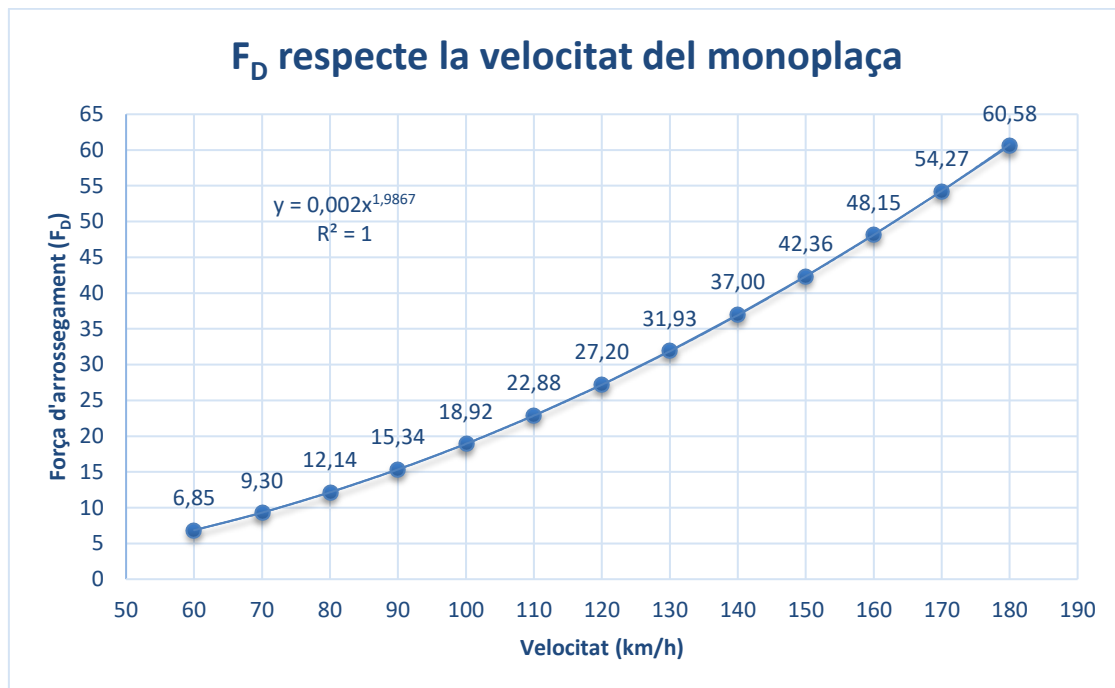


Figura 6.28. Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) de l'aleró davanter a 4° en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

6.2.2. Aleró posterior

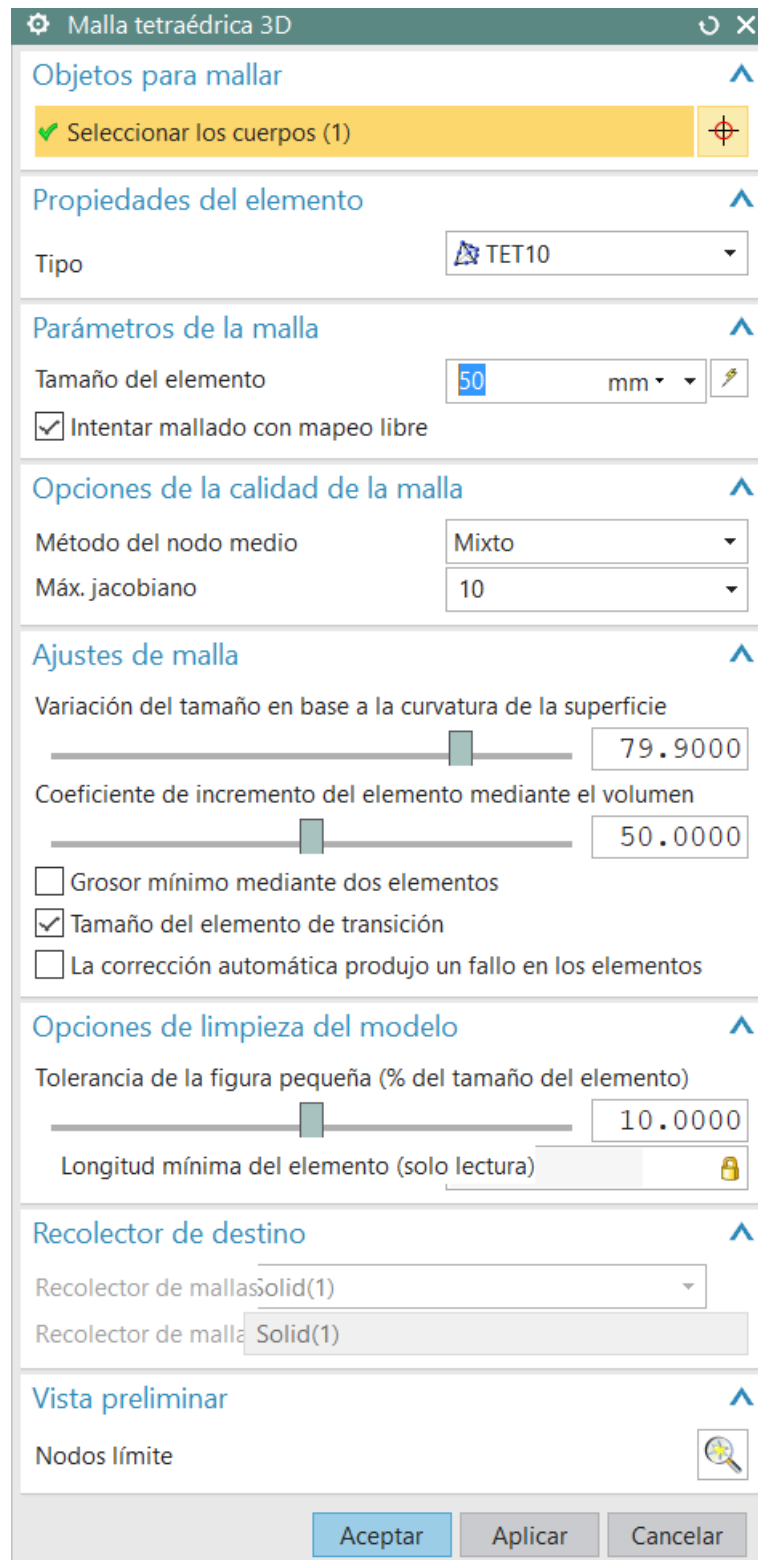


Figura 6.29. Determinació del mallat del volum d'aire utilitzat per la prova.
[Siemens NX]

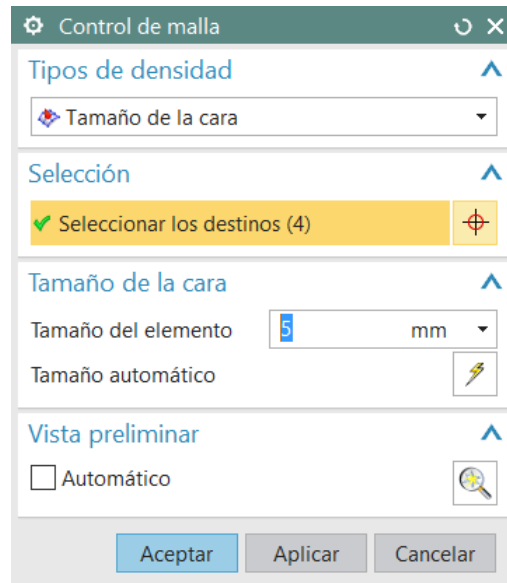


Figura 6.30. Control de malla de les dimensions de les cares del perfil de 5 mm.
[Siemens NX]

Seguidament determinem un flux d'entrada de 130km/h que és la velocitat utilitzada per la comparació dels càlculs. I l'àrea planar utilitzada és de 82720 mm² així com la densitat de l'aire de 1.204 kg/m³.

Configuració original dels perfils

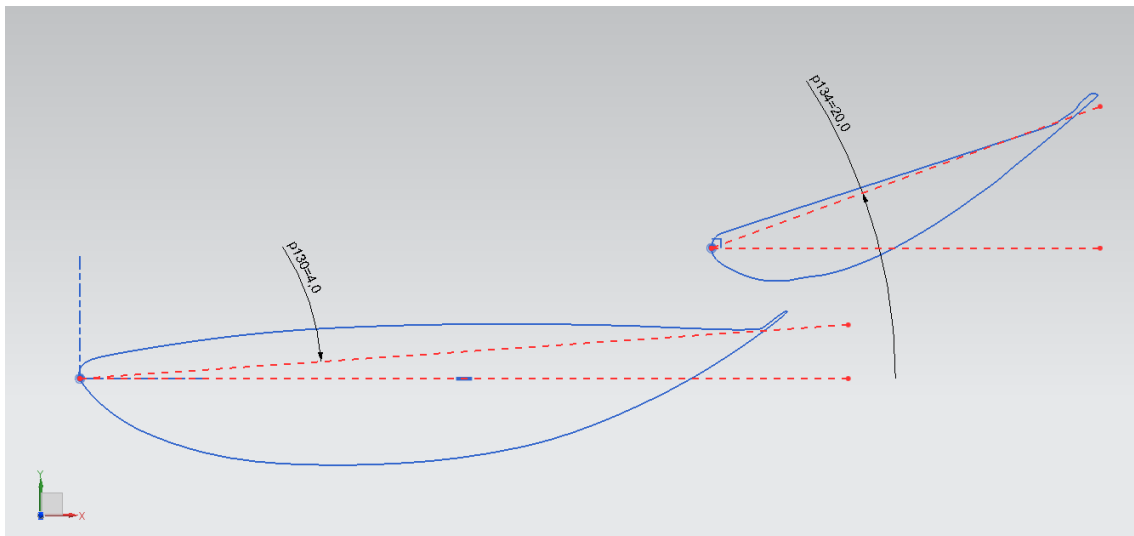


Figura 6.31. Esquema representatiu de la configuració dels perfils posterior originals.
[Autor]

Per fer l'estudi tridimensional de l'aleró posterior apliquem els mateixos paràmetres de càlcul del "solver" i seguim les mateixes passes explicades a l'apartat anterior amb les quals hem realitzat la simulació de l'aleró davanter. A més calculem tot el conjunt de l'aleró, això ens implica que per contrastar els resultats haurem de fer-ho amb el sumatori del resultats del càlcul de les forces obtingudes en l'estudi bidimensional.

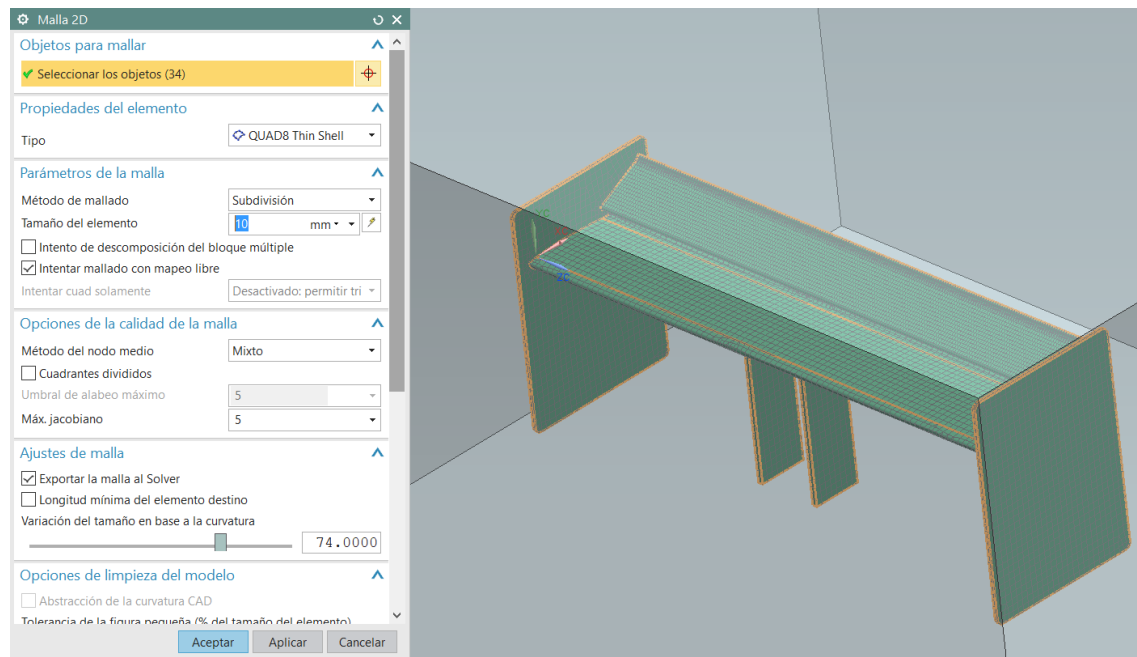


Figura 6.32. Malla 2D utilitzada per l'aleró posterior. [Siemens NX]

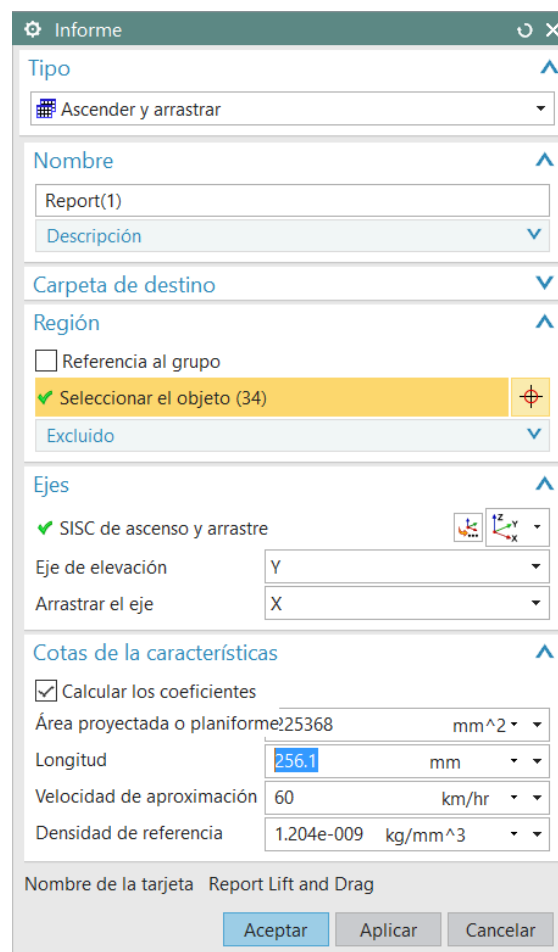


Figura 6.33. Dades per l'obtenció dels coeficients d'arrossegament i de sustentació.
[Siemens NX]

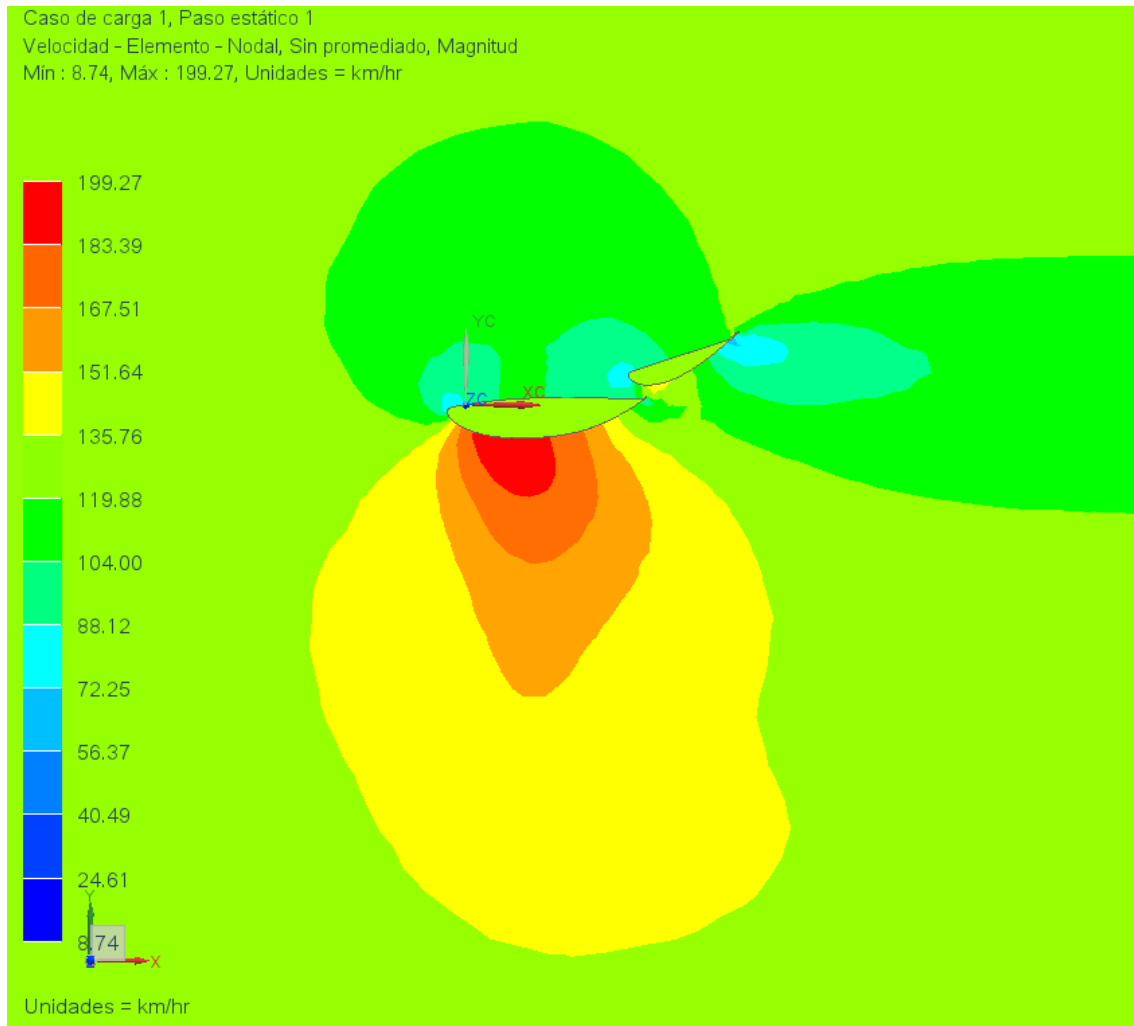


Figura 6.34. Velocitats absolutes a traves de l'aleró posterior. [Siemens NX]

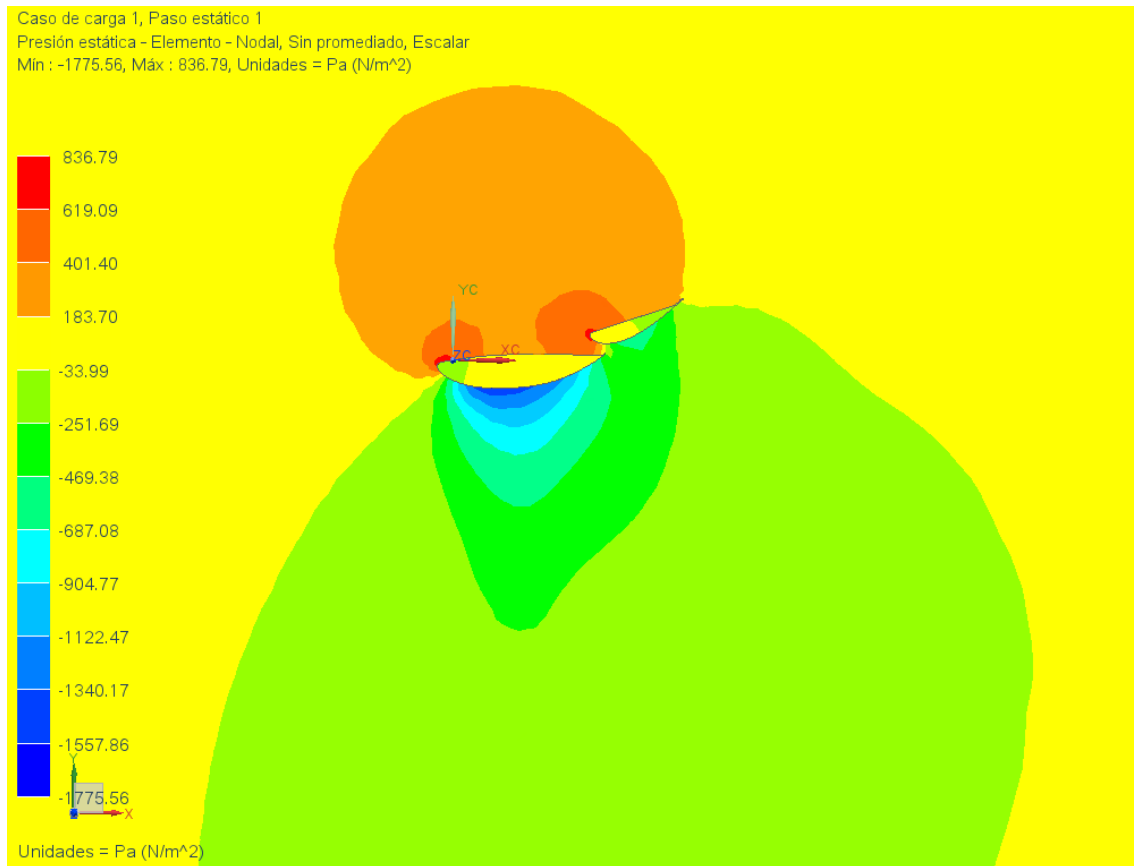


Figura 6.35. Increment de pressió relativa a l'aleró posterior. [Siemens NX]

En la figura 6.34 es pot observar com varia la velocitat del fluid realitzant l'estudi a 130km/h s'incrementa fins a 212.42 km/h. A la figura 6.35 observem les pressions relatives a través de l'aleró creant una pressió màxima de 2122.43 Pa.

Taula 6.2. Resum dels resultats 3D de l'aleró posterior.

Velocitat (km/h)	Mach	Reynolds	C_L/C_D	C_L	C_D	F_L (N)	F_D (N)
60,0	0,0490	178520,97	4,39	1,58	0,369	59,54	13,91
70,0	0,0571	208274,47	4,28	1,584	0,3704	81,25	19,00
80,0	0,0653	238027,96	4,28	1,587	0,3705	106,33	24,82
90,0	0,0735	267781,46	4,29	1,589	0,3706	134,74	31,42
100,0	0,0816	297534,95	4,29	1,592	0,3707	166,66	38,81
110,0	0,0898	327288,45	4,30	1,594	0,3707	201,91	46,96
120,0	0,0980	357041,94	4,30	1,596	0,3709	240,59	55,91
130,0	0,1061	386795,44	4,31	1,598	0,371	282,71	65,64
140,0	0,1143	416548,93	4,31	1,6	0,371	328,29	76,12
150,0	0,1224	446302,43	4,31	1,602	0,372	377,34	87,62
160,0	0,1306	476055,92	4,30	1,604	0,373	429,86	99,96
170,0	0,1388	505809,42	4,31	1,606	0,373	485,88	112,85
180,0	0,1469	535562,91	4,31	1,609	0,373	545,74	126,51

C_L de l'aleró posterior respecte a la velocitat del monoplaça

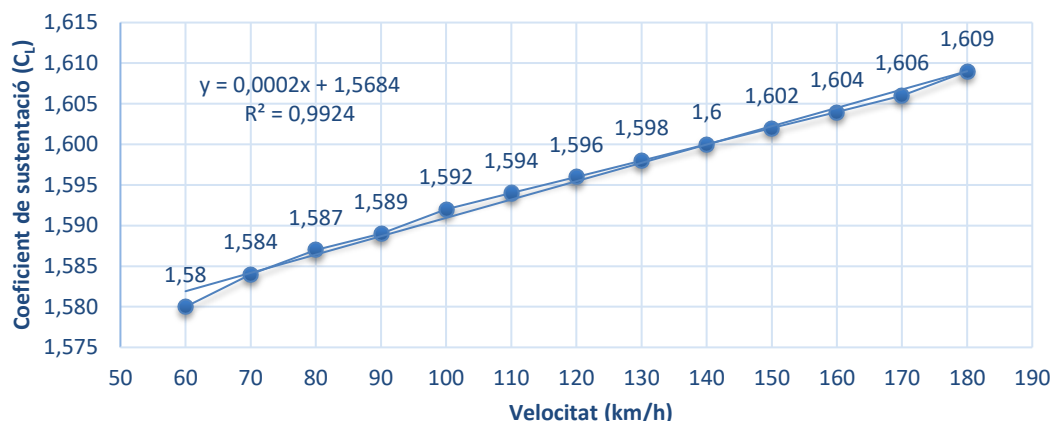


Figura 6.36. Tendència del coeficient d'anti-sustentació 3D (C_L) de l'aleró posterior sense modificació en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

C_D de l'aleró posterior respecte a la velocitat del monoplaça

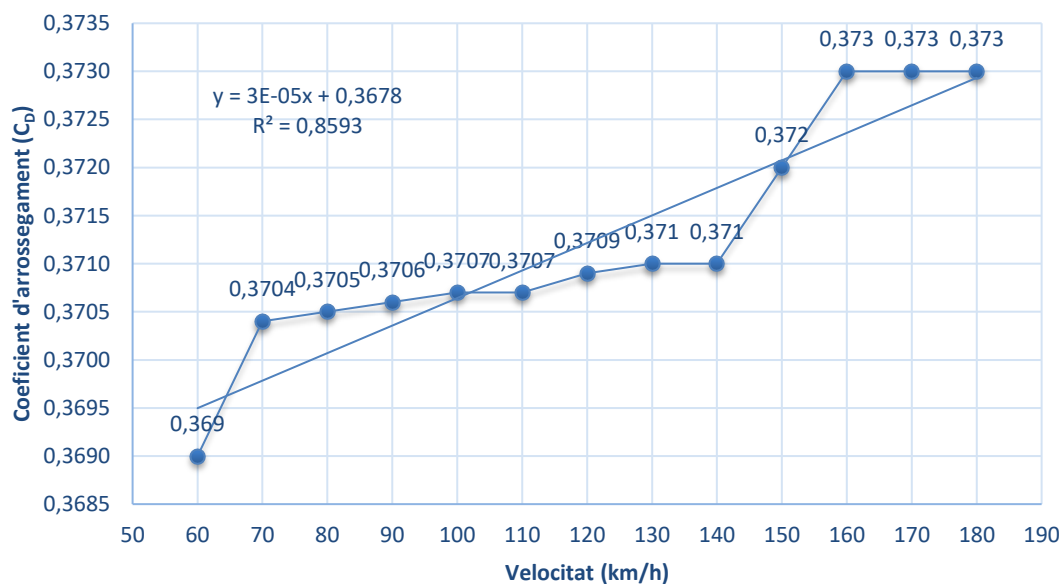


Figura 6.37. Tendència del coeficient d'arrossegament 3D (C_D) de l'aleró posterior sense modificació en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

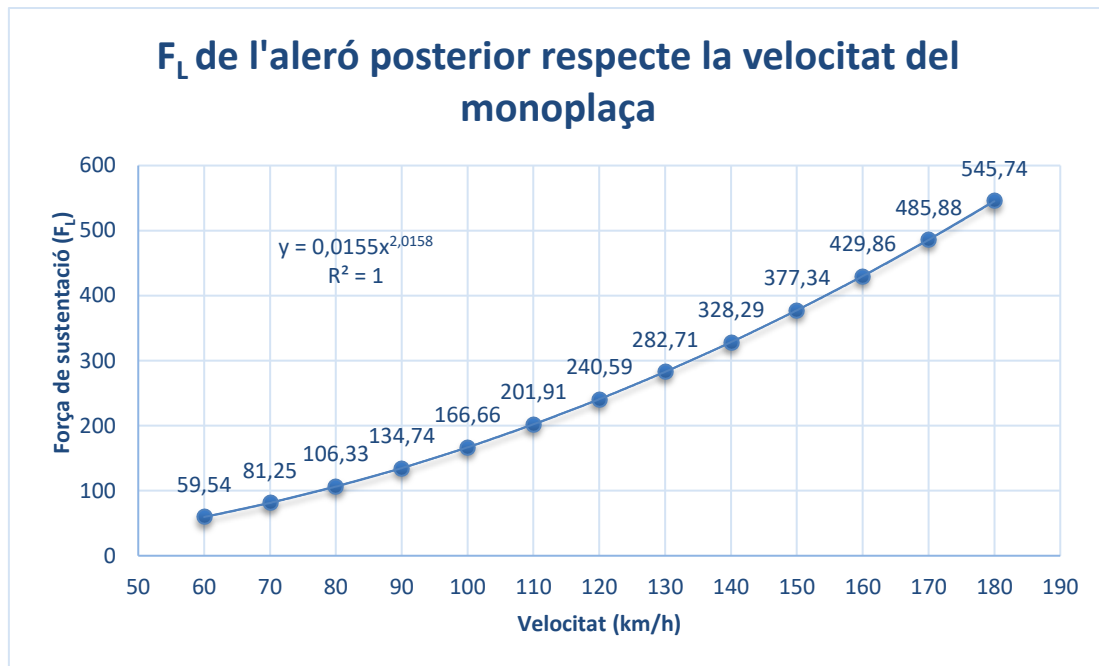


Figura 6.38. Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) de l'aleró posterior sense modificació en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

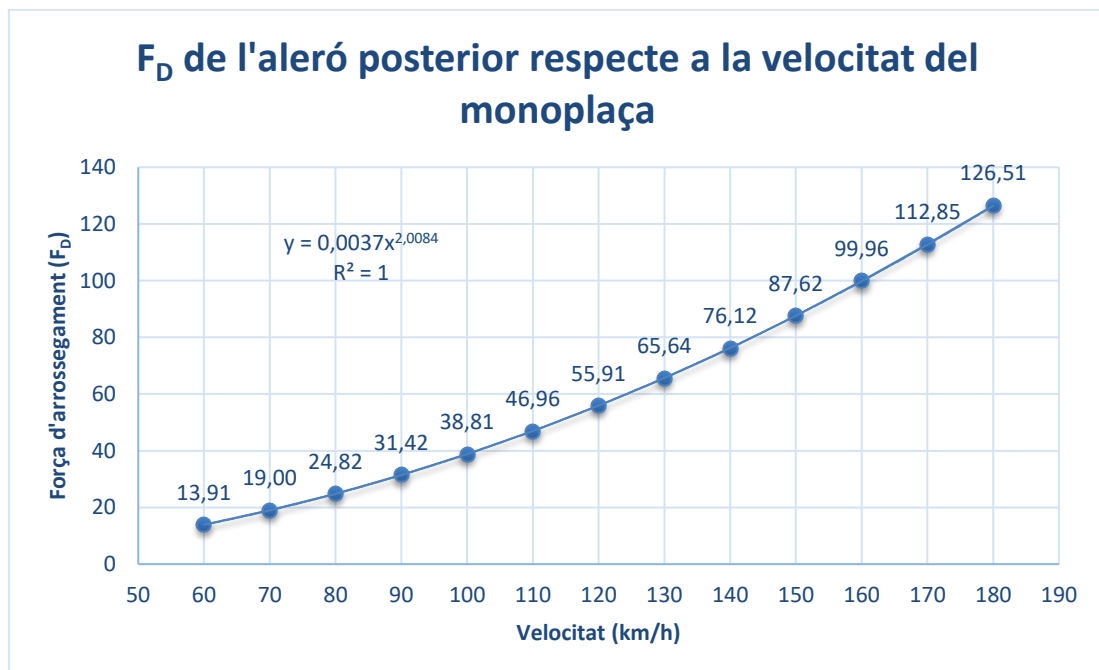


Figura 6.39. Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) de l'aleró posterior sense modificació en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

6.2.3. Resultats de la simulació numèrica dels alerons actuals.

Taula 6.3. Resum resultats de la simulació numèrica dels alerons actuals.

	Aleró davanter		Aleró posterior		Total	
Velocitat (km/h)	F _L (N)	F _D (N)	F _L (N)	F _D (N)	F _L (N)	F _D (N)
60,0	38,34	6,85	59,54	13,57	97,88	20,42
70,0	52,26	9,30	81,25	19	133,51	28,30
80,0	68,36	12,14	106,33	24,82	174,69	36,96
90,0	86,78	15,34	134,74	31,42	221,52	46,76
100,0	107,30	18,92	166,66	38,81	273,96	57,73
110,0	130,03	22,88	201,91	46,96	331,94	69,84
120,0	154,98	27,20	240,59	55,91	395,57	83,11
130,0	182,16	31,93	282,71	65,64	464,87	97,57
140,0	211,58	37,00	328,29	76,12	539,87	113,12
150,0	243,62	42,36	377,34	87,62	620,96	129,98
160,0	278,02	48,15	429,86	99,96	707,88	148,11
170,0	313,86	54,27	485,88	112,85	799,74	167,12
180,0	352,40	60,58	545,74	126,51	898,14	187,09

A partir de la simulació numèrica dels alerons obtenim una càrrega aerodinàmica d'anti-sustentació total a 130km/h de 464.87 N i una càrrega d'arrossegament de 97.57N.

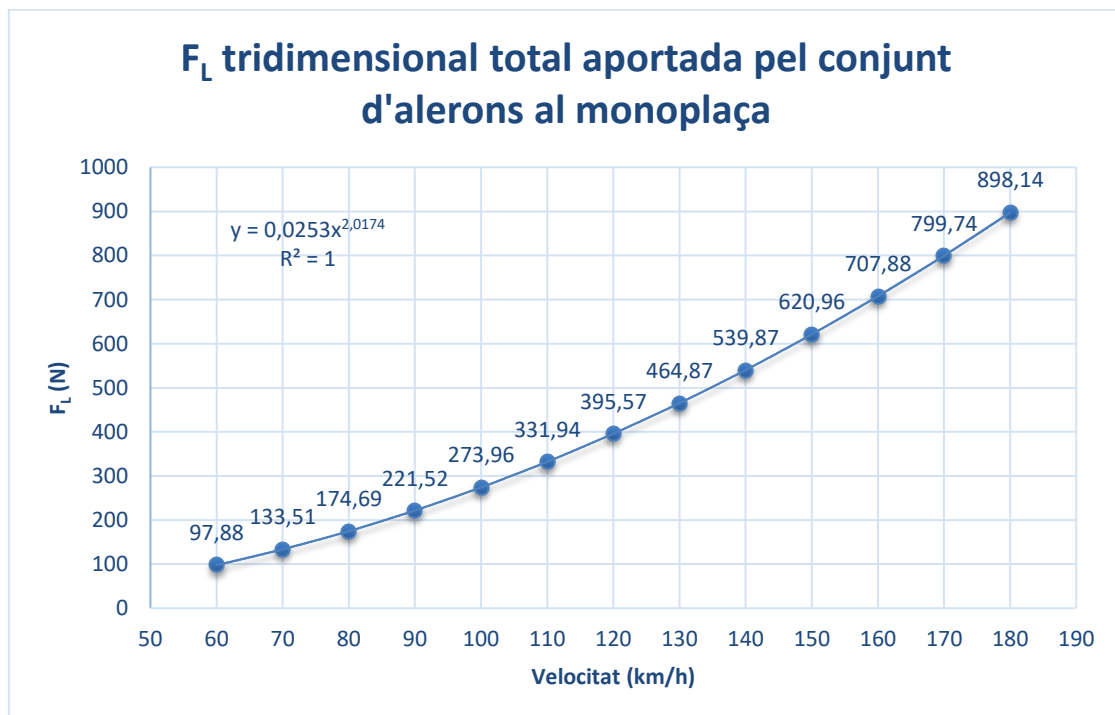


Figura 6.40. Tendència de la força de sustentació tridimensional (F_L) total aportada al monoplaça pel conjunt d'alerons sense modificar en relació a la velocitat. [Autor]

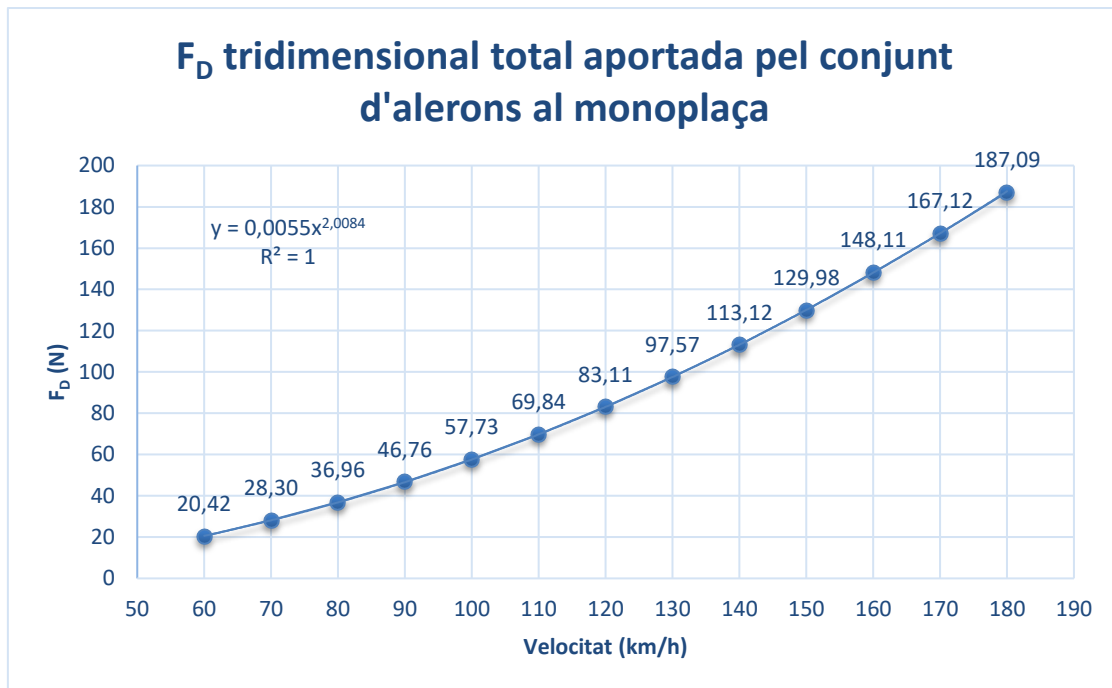


Figura 6.41. Tendència de la força d'arrossegament tridimensional (F_D) total aportada al monoplaça pel conjunt d'alerons sense modificar en relació a la velocitat. [Autor]

6.3. Proposta de millora

6.3.1. Modificacions de l'aleró davanter

Variació a l'angle d'atac òptim.

Com hem pogut obtenir anteriorment, a partir de l'estudi de l'aleró davanter del monoplaça hem conclòs que una de les possibles millores seria modificar la inclinació de l'angle d'atac que actualment està en 4° .

Observant les figures 6.42 i 6.43 dels dos coeficients respecte l'angle d'atac ens adonem que el coeficient d'arrossegament es dispara potencialment a partir d'un valor d'angle d'atac de 8° . En aquest punt es troba el punt de tangència de la corba que fa incrementar el coeficient (C_D).

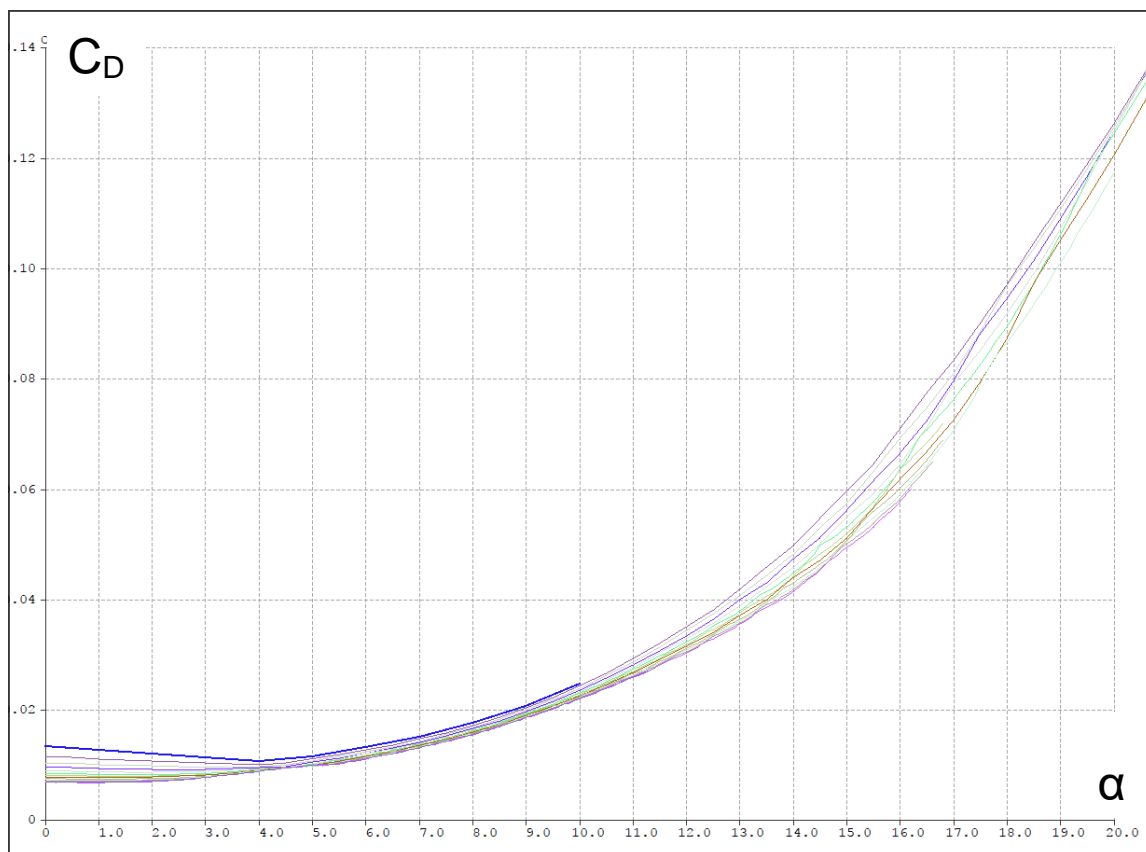


Figura 6.42. Coeficient d'arrossegament (C_D) respecte l'angle d'atac. [XFLR5]

Per el cas del coeficient d'anti-sustentació (C_L) representat a la gràfica 6.43, observem que va augmentant fins a un valor aproximat de l'angle d'atac de 15° . Aquest valors ens indiquen que per sobre d'una inclinació de 15° , ja no ens trobaríem amb unes especificacions de millora de la força d'anti-sustentació. Per tant, el rang de valors que tindríem que estudiar per obtenir el valor òptim de la configuració de l'aleró davanter anirien entre els 4° actuals fins a 15° .

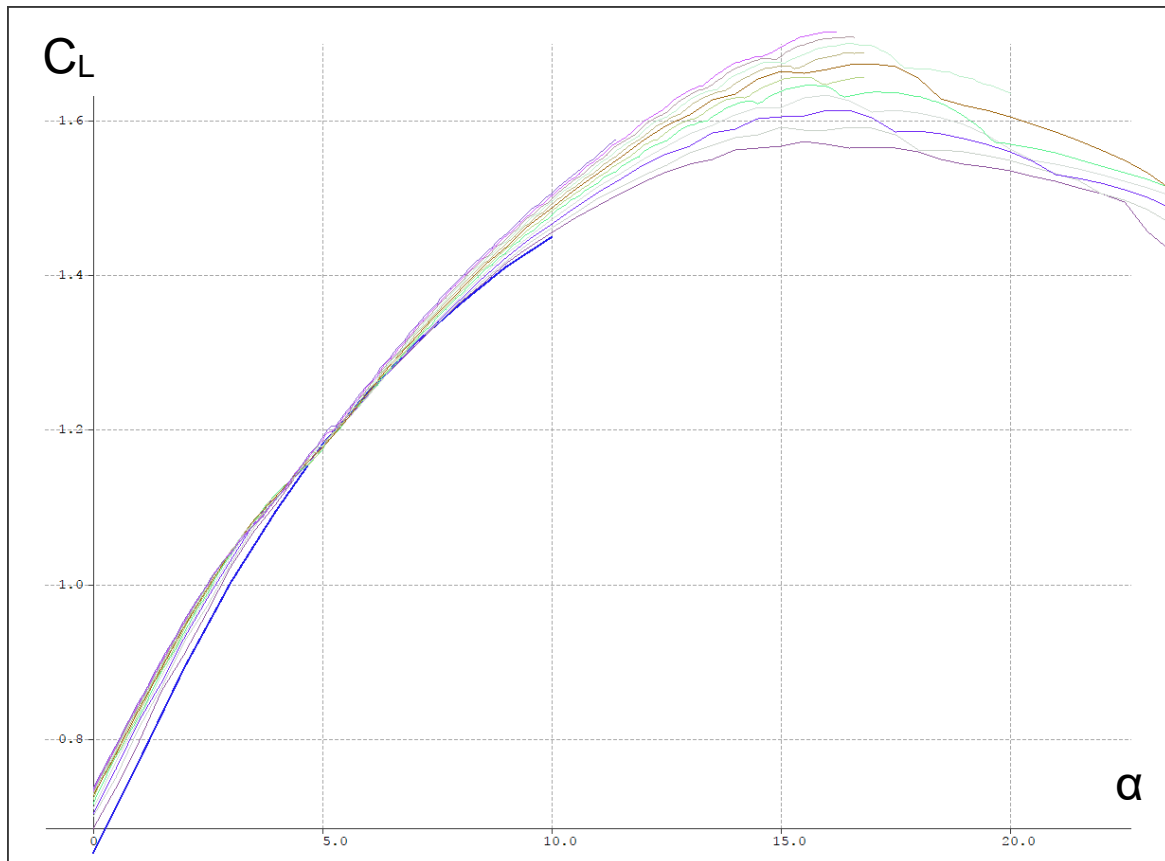


Figura 6.43. Coeficient d'anti-sustentació (C_L) respecte l'angle d'atac. [XFLR5]

Un cop obtingut el rang de valors de la configuració de l'angle d'atac que va entre 4° i 15° , ens centrarem en les modificacions del perfil que volem implementar i que afectaran en gran part a aquests valors.

Les modificacions es basen en incrementar la longitud de l'aleró i d'implementar uns difusors perquè part de l'aire incident que va en direcció a les rodes no penetri directament a elles, sinó que es desviï per sobre.

Modificació de la longitud total de l'aleró

Aquesta primera modificació la podem realitzar ja que el monoplaça actualment està competint en règim regional, més concretament al Campionat de Balears de Muntanya, i aquest fet fa que puguem realitzar aquesta modificació perquè el reglament pel qual es regeix no ho prohibeix. Per altre banda, si hagués de competir en un campionat on la normativa fos més estricta, no podríem cursar.

Amb les mesures generals del monoplaça com podem veure en la figura 5.44, es pot observar el marge que tenim per realitzar la modificació ja que l'aleró davanter té una longitud inferior a la dels eixos de les rodes.

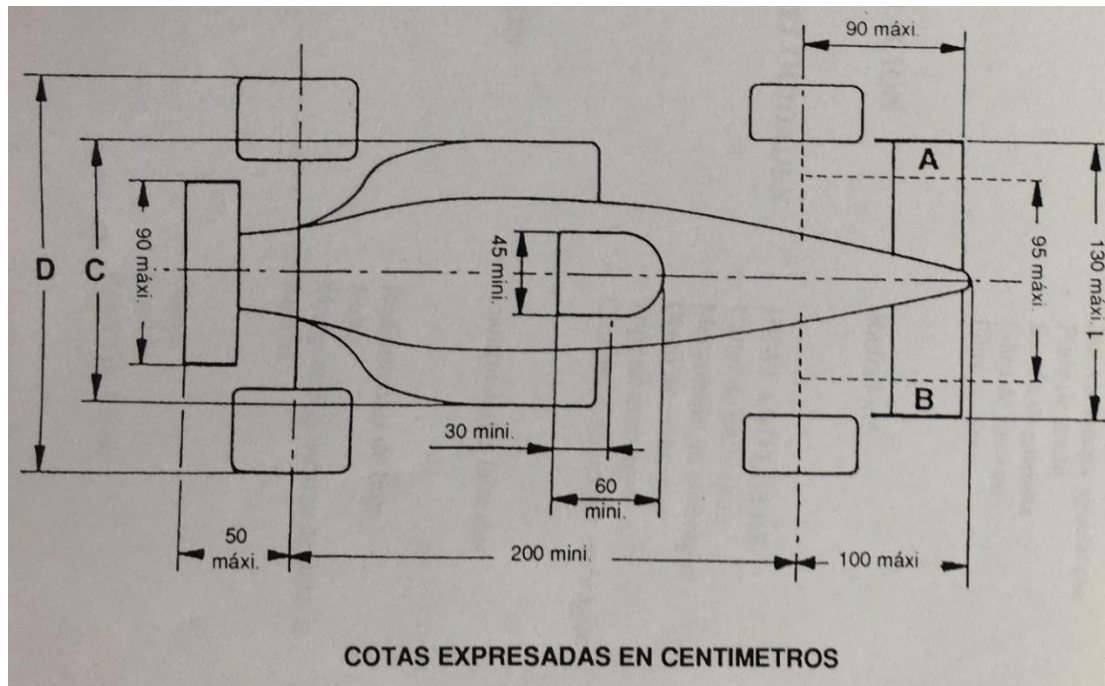


Figura 6.44. Plànol de cotes generals. [Autor]

On la cota D és l'ample de vies (D=1550 mm) i de l'aleró davant actual és de 1250 mm.

La proposta és incrementar el perfil de l'aleró fins la meitat de les rodes i així podem obtenir l'increment de superfície alar i posteriorment implementar la segona millora que és el difusor per dirigir l'aire per sobre de les rodes.

Les noves mesures de l'aleró davant seran;

$$\text{Aleró davant} = 1250 + \frac{1550 - 1250}{2} = \boxed{1400\text{mm}}$$

La mesura total del nou perfil de l'aleró davant seria de 1400mm i es veuria incrementat 75mm per banda així com podem veure en la figura 45.

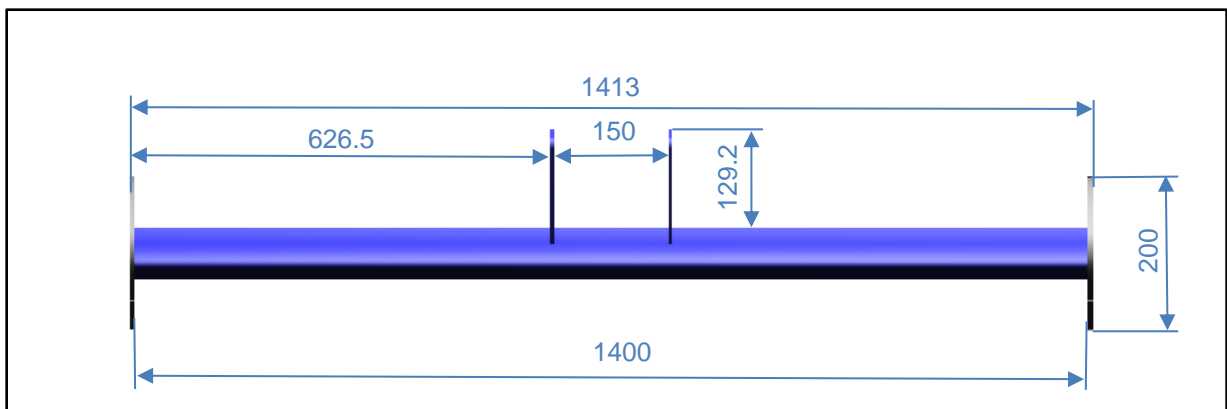


Figura 6.45. Croquis de l'aleró davant amb la primera modificació i amb cotes generals. [Autor]

Aquesta millora està directament relacionada amb l'augment de les càrregues aerodinàmiques pel seu increment d'àrea alar.

L'àrea alar en aquest cas seria:

$$A = 1.40 * 0.28 = 0.392m^2$$

en contra de la primera àrea de:

$$A_1 = 0.28 * 1.25 = 0.35m^2$$

Obtindrem un increment de:

$$\Delta = 0.392 - 0.35 = 0.042m^2$$

Amb els coeficients d'arrossegament i de sustentació i la nova àrea del perfil que hem calculat abans, procedim a re-calcular les càrregues aerodinàmiques per les diferents velocitats.

Taula 6.4. Resum de l'increment de les càrregues de l'aleró davanter amb estudi bidimensional

Velocitat (km/h)	Aleró antic $\alpha = 4^\circ$ $A = 0.35m^2$		Aleró modificat $\alpha = 7^\circ$ $A = 0.392m^2$		Diferència $\Delta\alpha = 3^\circ$ $\Delta A = 0.042m^2$	
	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)	ΔF_L (N)	ΔF_D (N)
60,0	64,03	0,64	85,81	0,98	21,78	0,34
70,0	87,95	0,78	116,52	1,34	28,58	0,56
80,0	114,97	0,99	152,43	1,63	37,45	0,64
90,0	145,58	1,22	192,77	2,06	47,19	0,84
100,0	179,81	1,46	238,53	2,55	58,72	1,09
110,0	217,77	1,75	288,63	3,08	70,86	1,33
120,0	259,86	2,06	344,8	3,41	84,94	1,35
130,0	304,98	2,39	404,66	4	99,68	1,61
140,0	354,02	2,74	472,16	4,64	118,14	1,90
150,0	407,50	3,11	542,03	5,33	134,53	2,22
160,0	464,06	3,50	617,17	6,06	153,11	2,56
170,0	524,35	3,90	698,31	6,84	173,96	2,94
180,0	588,38	4,21	785,24	7,67	196,86	3,46

Com podem observar en la taula 6.4, a una velocitat mitjana del monoplaça de 130km/h incrementem la força d'anti-sustentació a $F_L = 99.68 N \approx 100N$ i també es veu incrementada la força d'arrossegament en $F_D = 1.61 N$.

Implementació d'un difusor als laterals de l'aleró.

La tercera proposta de millora es basa en la implementació de dos difusors a les parts laterals del perfil de l'aleró davanter, abans de les platines exteriors. Aquests difusors fan la funció de dirigir l'aire del flux incident per amunt de les rodes. Aquest fet fa disminuir la força d'arrossegament deguda a aquest impacte del flux amb les rodes davanteres.

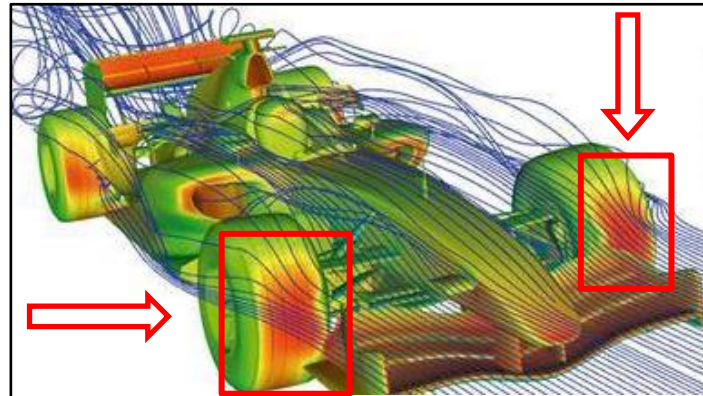


Figura 6.46: Monoplaça de la Formula 1, estudiant el punts crítics des del punt de vista de l'aerodinàmica en CFD. [24]

Com podem veure amb la figura 6.46, el gradient de color ens mostra que el flux penetrant a les rodes davanteres crea una gran càrrega de resistència a l'avanç.

El disseny dels difusors els realitzem modificant el perfil alar que ja havíem obtingut, creant uns difusors en els extrems que en permetran redirigir el flux per sobre de les rodes davanteres.

Després de realitzar diversos models d'assaig utilitzem el software Siemens NX per la comprovació si hi trobem una millora. Per realitzar les comprovacions d'efectivitat dels alerons, realitzem els càlculs a 130km/h, l'àrea projectada que agafem és l'àrea total de l'aleró davanter modificat 0.392 m².

Taula 6.5. Comparativa de les propostes de millora envers a l'aleró original a partir de l'estudi tridimensional.

Velocitat (km/h)	Aleró antic $\alpha = 4^\circ$ $A = 0,35\text{m}^2$		Aleró modificat $\alpha = 7^\circ$ $A = 0,392\text{m}^2$ +Aletes		Diferència $\Delta\alpha = 3^\circ$ $\Delta A = 0,042\text{m}^2$	
	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)	ΔF_L (N)	ΔF_D (N)
130,0	182,16	31,93	372,66	102,78	190,5	70,85

Com veiem en la taula 6.5. Obtenim una millora de la força de sustentació en $F_L = 82,48\text{N}$ i per contra ens trobem amb un increment de la força d'arrossegament de $F_D = 33,0\text{N}$.

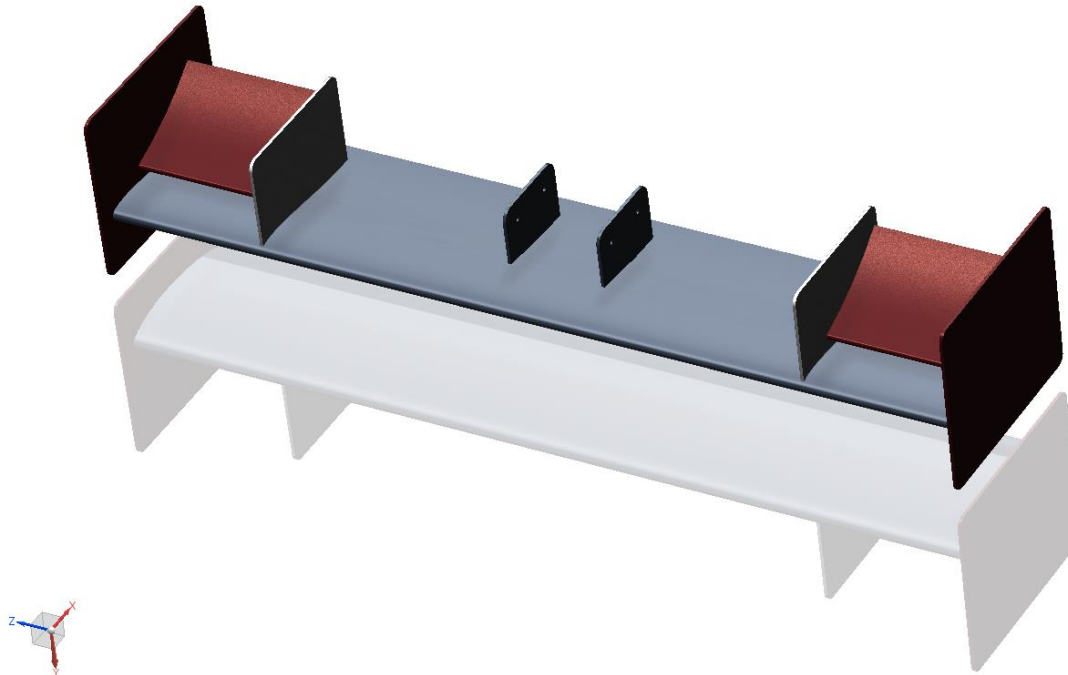


Figura 6.47. Aleró davanter modificat. [Autor]

Un cop implementades les modificacions de l'aleró davanter procedim a simular-lo amb el Software Siemens NX per obtenir les noves càrregues aerodinàmiques.

Resultats de la simulació numèrica de l'aleró davanter modificat.

Taula 6.6. Resum dels resultats 3D de l'aleró davanter modificat.

Velocitat (km/h)	Mach	Reynolds	C_L/C_D	C_L	C_D	F_L (N)	F_D (N)
60,0	0,0490	178520,97	3,58	1,205	0,337	78,99	22,09
70,0	0,0571	208274,47	3,61	1,206	0,3345	107,60	29,84
80,0	0,0653	238027,96	3,60	1,207	0,335	140,66	39,04
90,0	0,0735	267781,46	3,60	1,209	0,3358	178,32	49,53
100,0	0,0816	297534,95	3,60	1,208	0,336	219,96	61,18
110,0	0,0898	327288,45	3,61	1,21	0,335	266,59	73,81
120,0	0,0980	357041,94	3,62	1,211	0,3349	317,53	87,81
130,0	0,1061	386795,44	3,63	1,211	0,334	372,66	102,78
140,0	0,1143	416548,93	3,62	1,212	0,3344	432,55	119,34
150,0	0,1224	446302,43	3,63	1,213	0,334	496,96	136,84
160,0	0,1306	476055,92	3,63	1,213	0,3339	565,43	155,64
170,0	0,1388	505809,42	3,64	1,214	0,3338	638,84	175,66
180,0	0,1469	535562,91	3,64	1,215	0,334	716,80	197,05

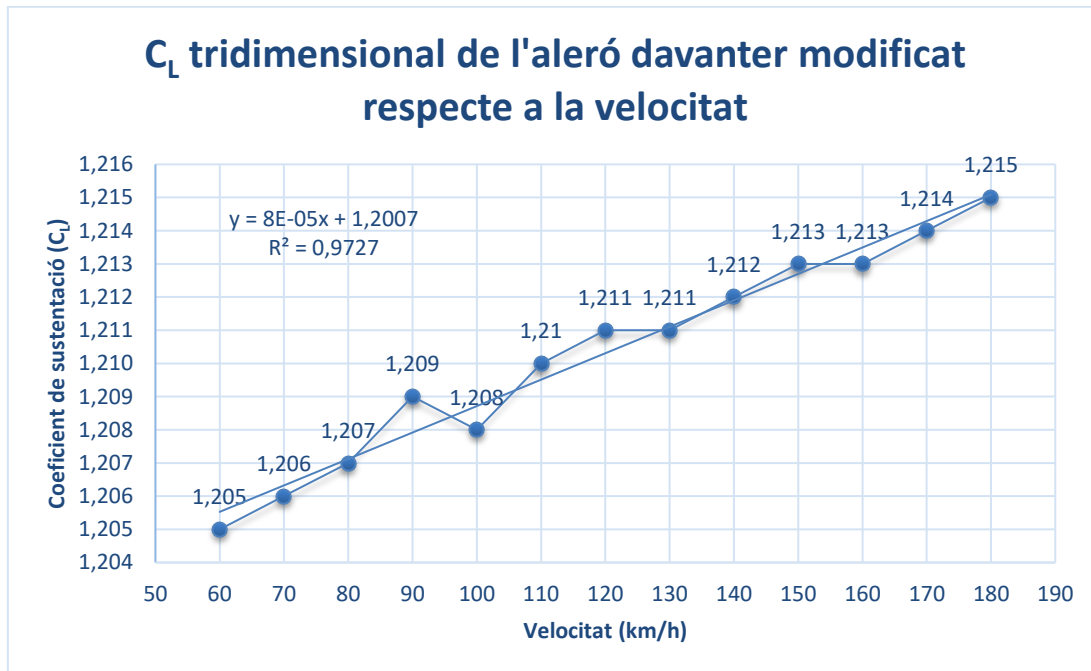


Figura 6.48. Tendència del coeficient d'anti-sustentació 3D (C_L) de l'aleró davanter modificat en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

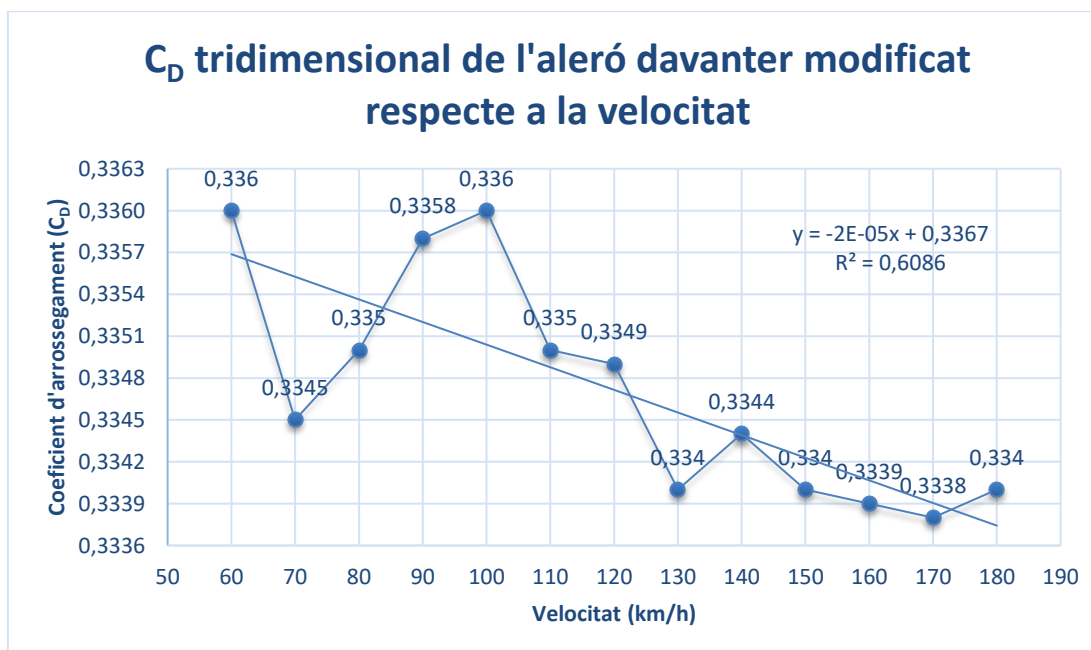


Figura 6.49. Tendència del coeficient d'arrossegament 3D (C_D) de l'aleró davanter modificat en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

En la figura 6.49 observem que hi trobem petites fluctuacions de l'ordre de 0.001, aquest fet pot ser degut a petites interferències provocades pel nou disseny. Tot i així, són mínimes.

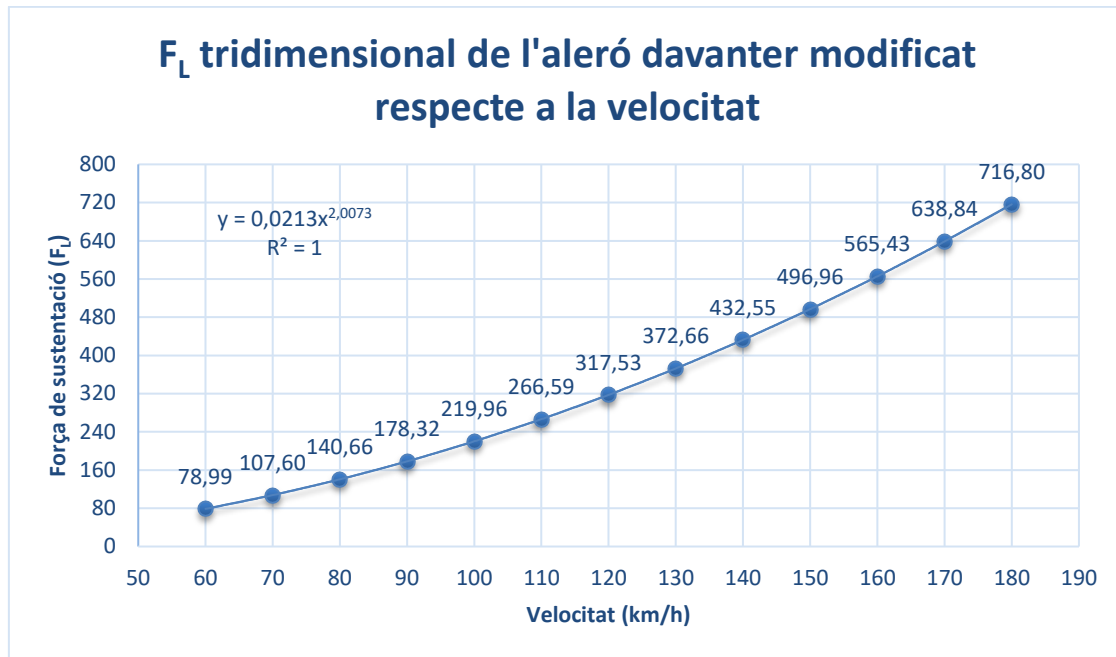


Figura 6.50. Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) de l'aleró davanter modificat en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

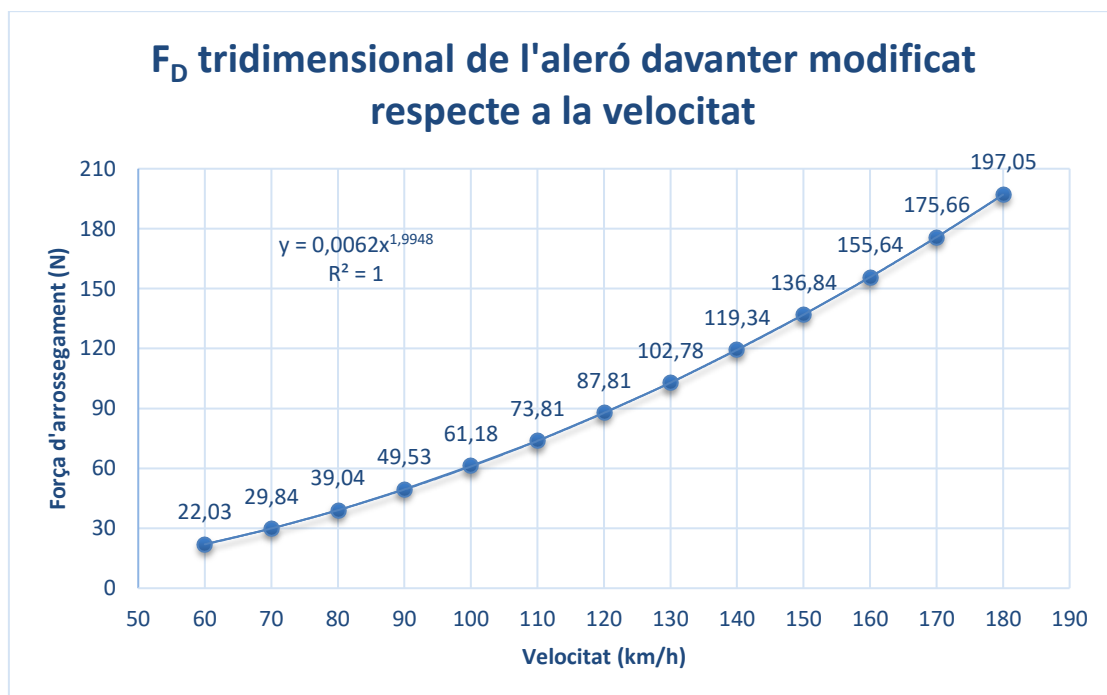


Figura 6.51. Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) de l'aleró davanter modificat en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

6.3.2. Modificacions de l'aleró posterior

Variació a l'angle d'atac òptim.

Ens centrem amb l'estudi bidimensional per obtenir el punt de màxima força de sustentació i mínima d'arrossegament. L'aleró posterior es divideix en les dues seccions que el configuren.

Secció 1.

Tot i així en el cas d'aquesta primera secció ens centrarem en millorar-lo, no tan sols amb la configuració del seu angle d'atac, sinó també amb una implementació d'un sistema "DRS".

Secció 2.

Observant les figures 6.52 i 6.53 dels dos coeficients respecte l'angle d'atac ens adonem que el coeficient d'arrossegament es dispara potencialment a partir d'un valor d'angle d'atac de 7° . En aquest punt es troba el punt de tangència de la corba que fa incrementar el coeficient (C_D).

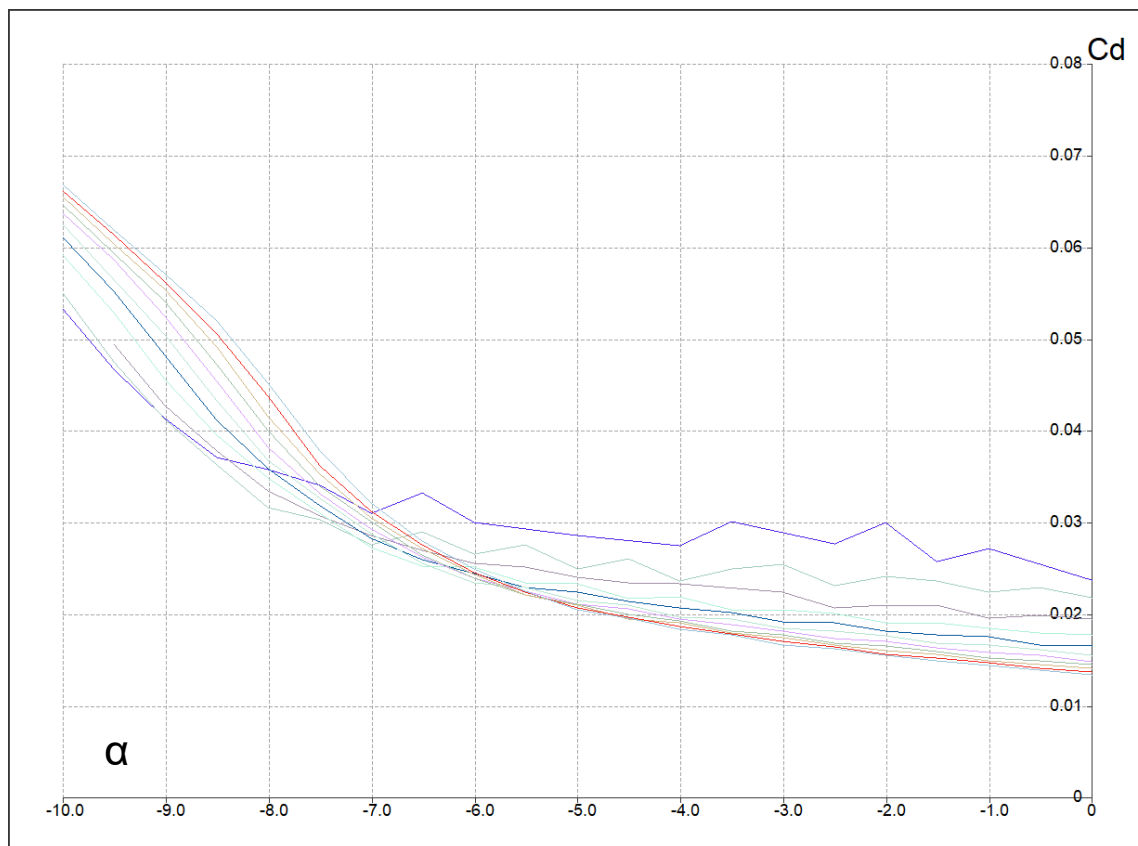


Figura 6.52. Coeficient d'arrossegament (C_D) respecte l'angle d'atac (α). [XFLR5]

Per al cas del coeficient d'anti-sustentació (C_i) representat a la figura 6.53, observem que va augmentant fins a un valor aproximat de l'angle d'atac també de 7° .

Aquest valor ens indica que per sobre d'una inclinació de 7° , ja no ens trobaríem amb unes especificacions de millora de la força d'anti-sustentació. Per tant, podríem afirmar que el valor òptim de l'angle d'atac per la majoria dels valors del rang de velocitats del monoplaça es 7° .

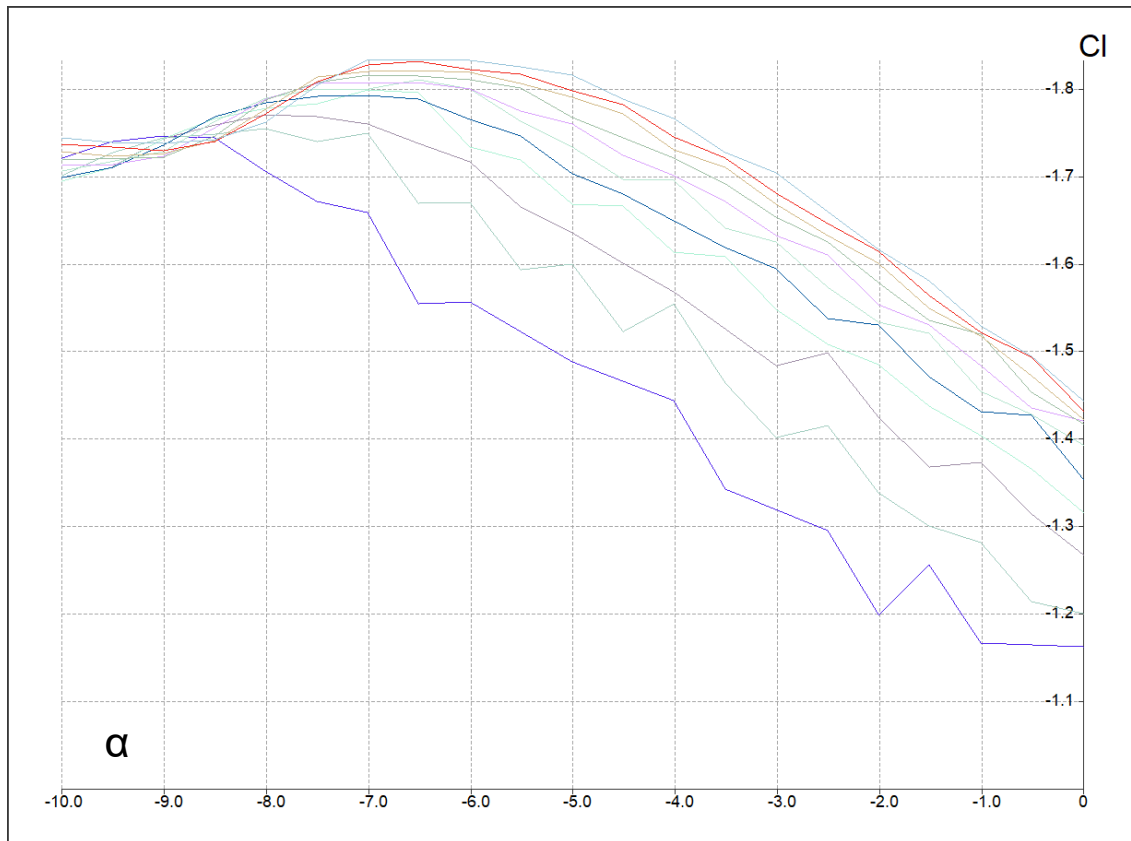


Figura 6.53. Coeficient d'anti-sustentació (C_L) respecte l'angle d'atac (α). [XFLR5]

A partir d'aquí, concloem que la configuracions òptimes dels angles d'atac per els perfil de l'aleró posterior són:

- Secció 1: "DRS"
- Secció 2: 7°

Un cop obtingut el punt de partida de la millora de l'aleró posterior, realitzem una taula comparativa amb les especificacions actuals i les especificacions de millora.

A partir del Siemens NX modifiquem els angles d'atac com veiem en la figura 6.54 de les dues seccions de l'aleró posterior.

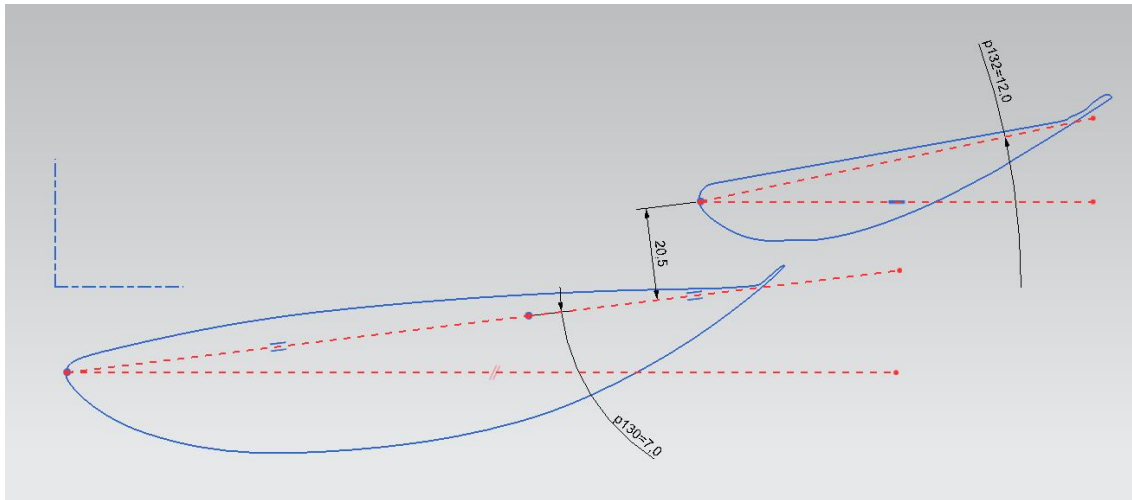


Figura 6.54. Modificació a als angles d'atac òptim de l'aleró posterior. [Autor]

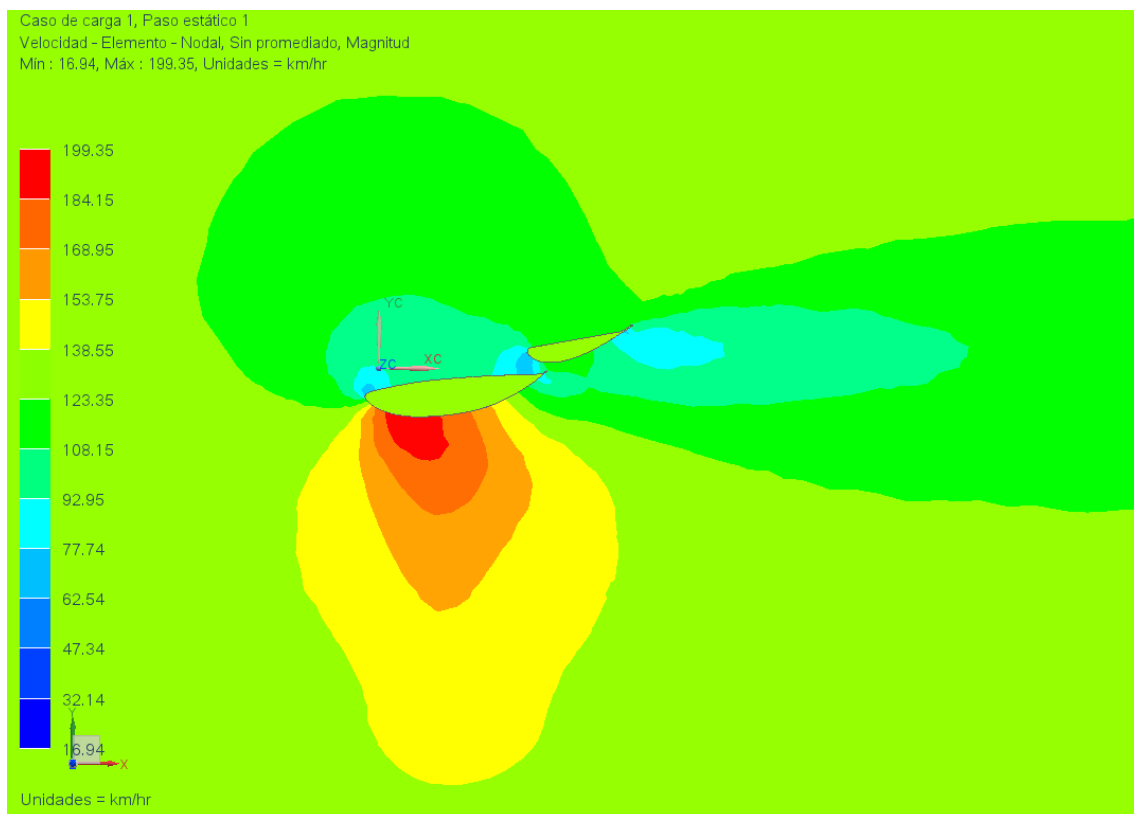


Figura 6.55. Diagrama de velocitats amb la configuració de l'aleró posterior modificat. [Siemens NX]

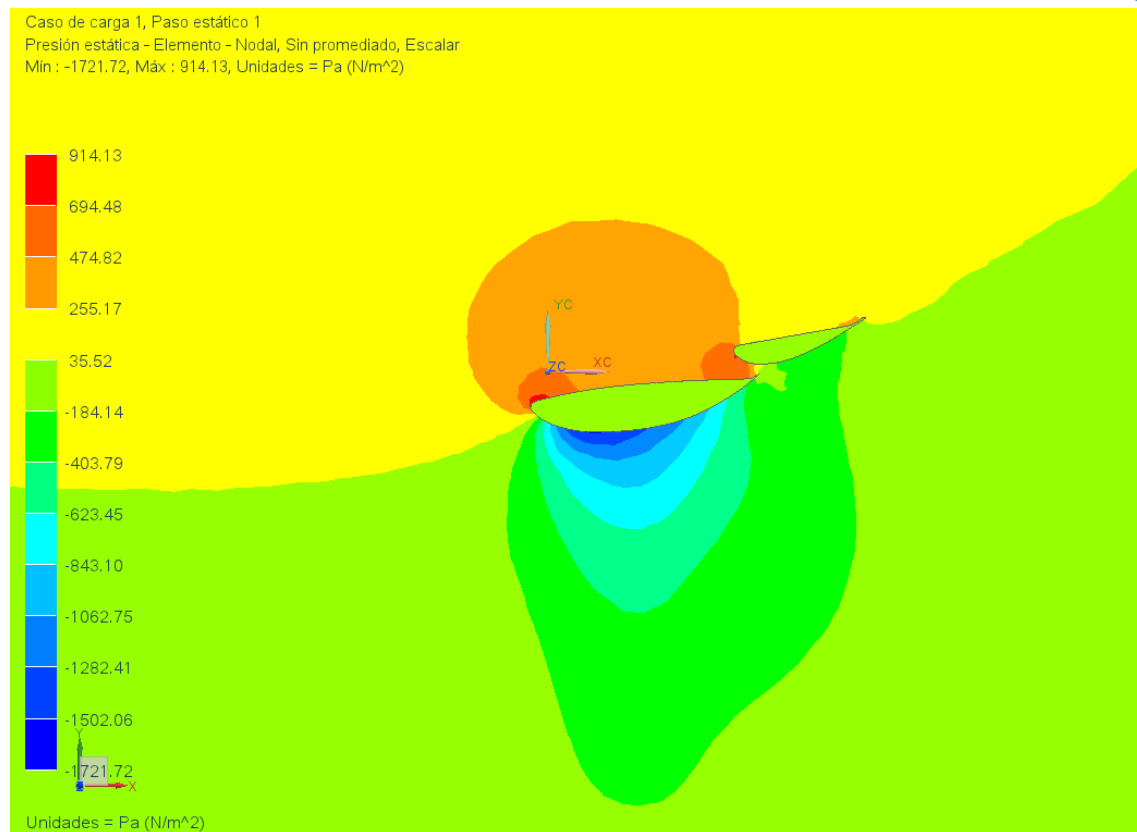


Figura 6.56. Diagrama de pressions amb la configuració de l'aleró posterior modificat.
[Siemens NX]

Resultats de la simulació numèrica de l'aleró posterior modificat.

Taula 6.7. Resum dels resultats 3D de l'aleró posterior modificat.

Velocitat (km/h)	Mach	Reynolds	C_L/C_D	C_L	C_D	F_L (N)	F_D (N)
60,0	0,0490	178520,97	3,84	1,927	0,502	72,62	18,92
70,0	0,0571	208274,47	3,80	1,938	0,51	99,41	26,16
80,0	0,0653	238027,96	3,80	1,939	0,51	129,91	34,17
90,0	0,0735	267781,46	3,84	1,9405	0,505	164,54	42,82
100,0	0,0816	297534,95	3,88	1,941	0,5	203,19	52,34
110,0	0,0898	327288,45	3,89	1,9425	0,499	246,05	63,21
120,0	0,0980	357041,94	3,90	1,9435	0,498	292,98	75,07
130,0	0,1061	386795,44	3,91	1,944	0,497	343,93	87,93
140,0	0,1143	416548,93	3,91	1,9445	0,497	398,98	101,98
150,0	0,1224	446302,43	3,92	1,946	0,496	458,36	116,83
160,0	0,1306	476055,92	3,93	1,9475	0,4955	521,92	132,79
170,0	0,1388	505809,42	3,94	1,9485	0,495	589,50	149,76
180,0	0,1469	535562,91	4,03	1,991	0,494	675,31	167,55

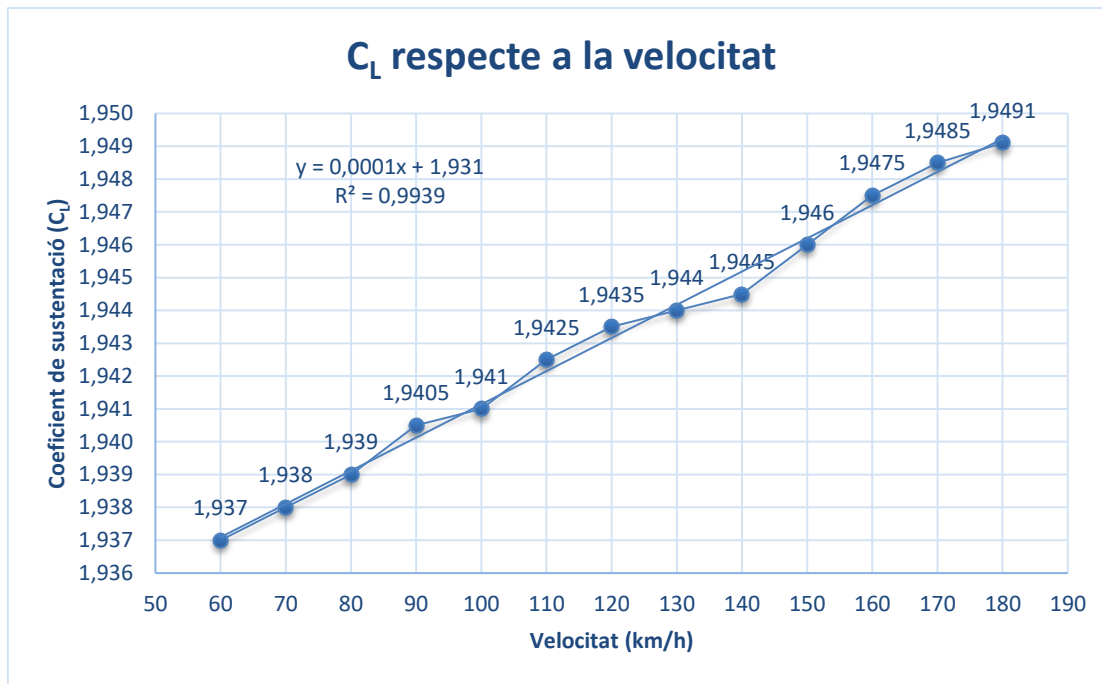


Figura 6.57. Tendència del coeficient d'anti-sustentació 3D (C_L) de l'aleró posterior modificat en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

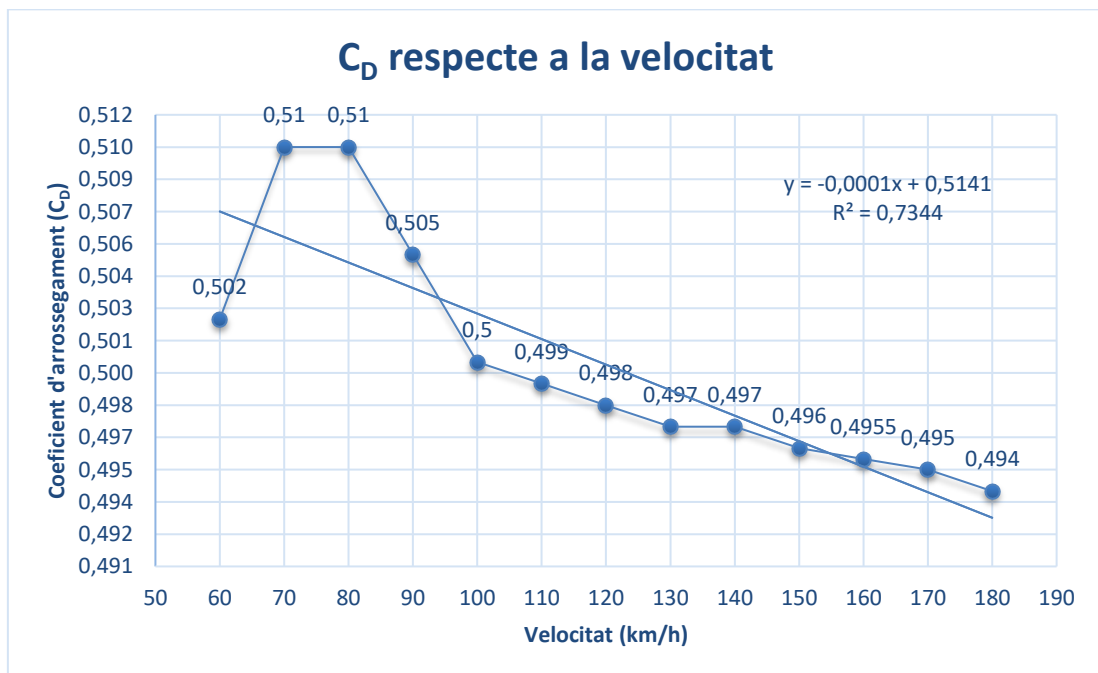


Figura 6.58. Tendència del coeficient d'arrossegament 3D (C_D) de l'aleró posterior modificat en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

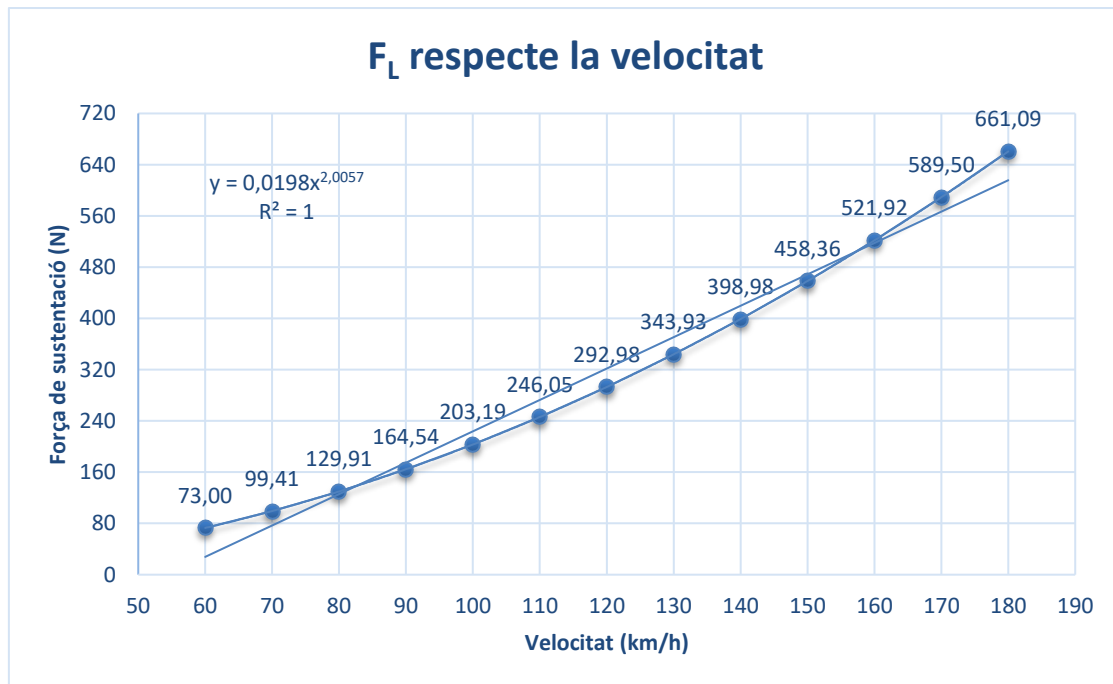


Figura 6.59. Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) de l'aleró posterior modificat en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

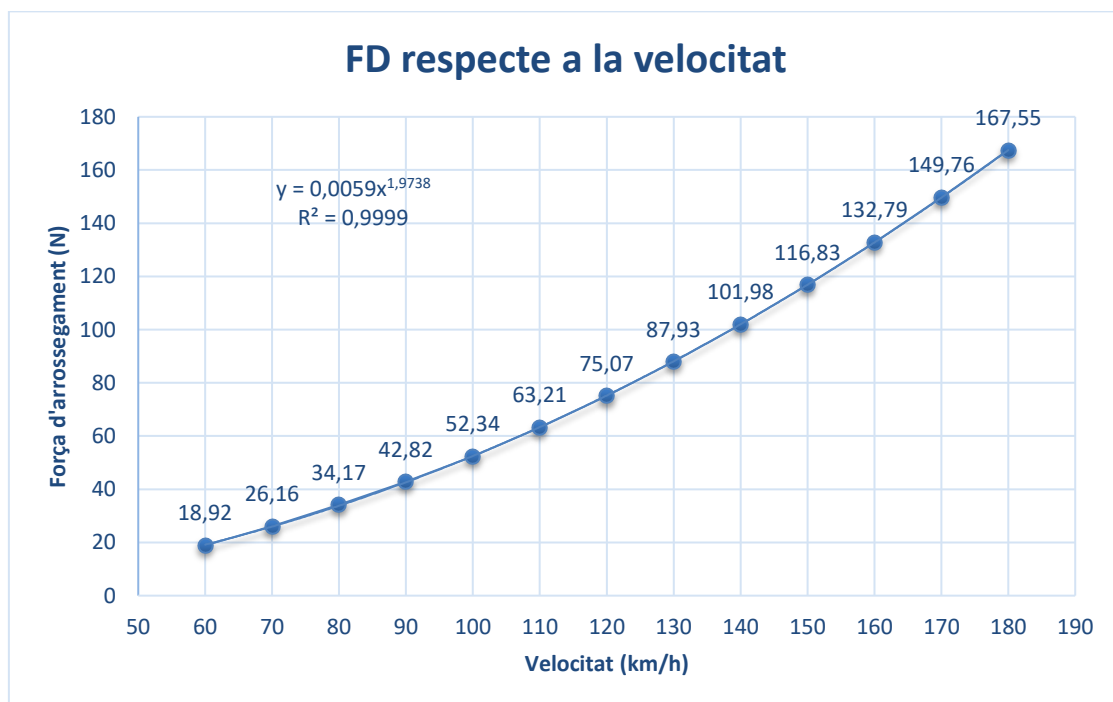


Figura 6.60. Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) de l'aleró posterior modificat en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

6.3.2.1. Disseny d'un sistema "DRS" actiu

En aquest apartat hem utilitzat la bibliografia [18], [19] [20], [Annex 3]

Els sistema "DRS" com hem vist anteriorment, és un sistema creat per disminuir o augmentar la càrrega d'arrossegament en punts del circuits on es requereixi una càrrega aerodinàmica determinada. Els punts que no necessiten càrrega aerodinàmica són rectes i els punts més necessitats són corbes.

La diferència del nostre sistema sobre el sistema "DRS" que trobem actualment en la Formula 1 és bàsicament que en l'actual tan sols té dues posicions, la de màxima inclinació i la de mínima inclinació, en canvi en el nostre podem determinar l'angle d'atac en tot moment depenent de cada circuit en concret i les seves característiques.

Aquest fet ens determina la possibilitat d'aprofitar al màxim l'aerodinàmica de l'aleró posterior en cada instant.

Per realitzar el sistema ens basem en un sistema de control directe a partir de la conducció i requeriments de cada pilot. Per poder controlar la inclinació en basarem amb l'angle de gir del volant, el sensor del pedal de fre i la velocitat del monoplaça.

6.3.2.1.1. Components del sistema.

Els components del sistema són bàsicament el perfil de l'aleró posterior utilitzat per la seva disposició més alta i la seva facilitat d'inclinació, un servomotor encarregat de transmetre el parell de gir; aquest està controlat per tres sensors, un que determina el grau de gir del volant, un altre determina si està activat el pedal de fre i finalment un últim sensor que ens proporciona la velocitat del monoplaça per poder ajustar el sistema en tot moment. Tots aquests components electrònics estan connectats a una placa "Arduino" que controla el sistema. Pel que fa al mecanisme, ens trobem dues barres que formen un parell de gir biela-manovella encarregades de transmetre el gir del servomotor al perfil de l'aleró.

El disseny de les dimensions de les barres s'ha realitzat tenint en compte el grau màxim requerit de la inclinació del perfil. Aquesta inclinació màxima s'ha obtingut observant la configuració de l'aleró real i ens ajustem als altres components actuals per poder aplicar la millora sense haver de modificar-lo.

Determinació del servomotor adient pel mecanisme.

Per poder determinar el servomotor que hauríem d'utilitzar perquè el sistema funcionés correctament ens hem centrat en calcular les forces que s'apliquen sobre el perfil en el cas més crític (180km/h).

Taula 6.8 Forces aerodinàmiques depenent de l'angle d'atac configurat pel sistema "DRS"

Angle (°)	F _L (180km/h)	F _D (180km/h)	Resultant (N)	Angle resultant (°)
0	138,78	48,72	147,08	19,34
1	161,64	47,95	168,60	16,52
2	179,13	47,28	185,26	14,79
3	198,98	50,06	205,18	14,12
4	235,06	55,98	241,64	13,40
5	252,59	59,24	259,45	13,20
6	270,19	63,15	277,47	13,16
7	286,56	67,64	294,43	13,28
8	302,57	72,37	311,10	13,45
9	318,27	77,55	327,58	13,69
10	332,57	83,01	342,77	14,02
11	346,98	88,53	358,10	14,31
12	360,67	94,59	372,87	14,70
13	372,65	100,81	386,04	15,14
14	385,66	107,73	400,42	15,61
15	396,41	113,99	412,47	16,04
16	408,23	121,22	425,85	16,54
17	417,54	127,89	436,69	17,03
18	427,17	135,34	448,10	17,58
19	435,17	142,52	457,91	18,13
20	442,42	150,47	467,30	18,78
21	448,05	157,76	475,01	19,40
22	453,47	165,26	482,65	20,02
23	458,81	172,51	490,17	20,61
24	462,66	180,36	496,57	21,30
25	466,63	188,30	503,19	21,98
26	468,18	195,50	507,36	22,67
27	470,13	202,69	511,96	23,32
28	471,09	210,55	516,00	24,08
29	472,82	219,28	521,19	24,88
30	472,21	226,48	523,71	25,62
31	470,27	233,86	525,21	26,44
32	465,64	241,18	524,39	27,38
33	459,83	248,34	522,60	28,37
34	457,30	256,61	524,38	29,30
35	452,33	263,68	523,57	30,24
36	447,07	271,21	522,91	31,24

A partir de la taula 6.8 podem determinar la força màxima que haurà de superar el mecanisme per poder moure lliurement el perfil de l'aleró. Com que el mecanisme és un sistema biela-manovella i la posició del servomotor està desplaçat no sabem a priori amb exactitud la força necessària que ha de fer el motor per contrarestar la força màxima deguda al flux.

Per poder determinar exactament quin és el parell necessari que hem d'aplicar al servomotor ens servim del software Siemens NX en el seu mòdul de simulació de moviment.

Entrem en el mòdul de simulació de moviment i apliquem les càrregues màximes que hem determinat abans (Taula 6.8. - Angle 31°-)

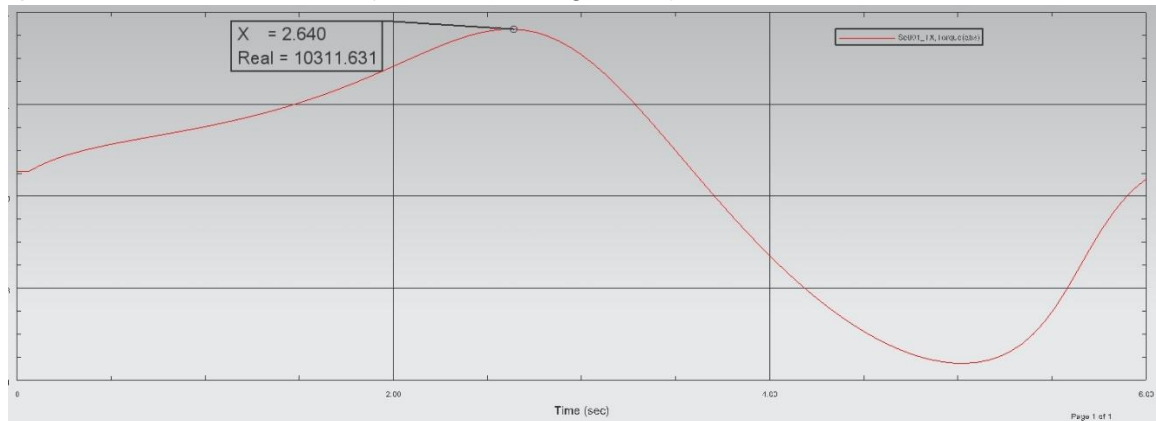


Figura 6.61. Gràfica del parell màxim del motor [N.mm] respecte al temps. [Autor]

Un cop obtinguda una primera gràfica del parell del servomotor com veiem en la figura 6.61 podem observar que el punt de màxim parell consumit pel motor segons la configuració del nostre mecanisme és a 2,64 segons. La gràfica està representada de 0 a 6 segons que és una volta completa.

Veiem que el punt obtingut no correspon amb el punt de 31° de l'angle d'atac per això, determinen les càrregues aerodinàmiques i les apliquem a aquest punt. Sabem que una l'obertura del perfil triga 3,54 segons i passa de 0 a 37°.

Quan ens trobem a 2,64 segons el mecanisme es troba en un angle d'atac de 24° (Taula 6.8). En aquest instant apliquem les càrregues aerodinàmiques a 24° i calculem el parell motor màxim que necessitem.

Els valors de F_L és 462.66N i F_D és 180.36N a 24°

Figura 6.62. Components de la força vectorial màxima.[Siemens NX]

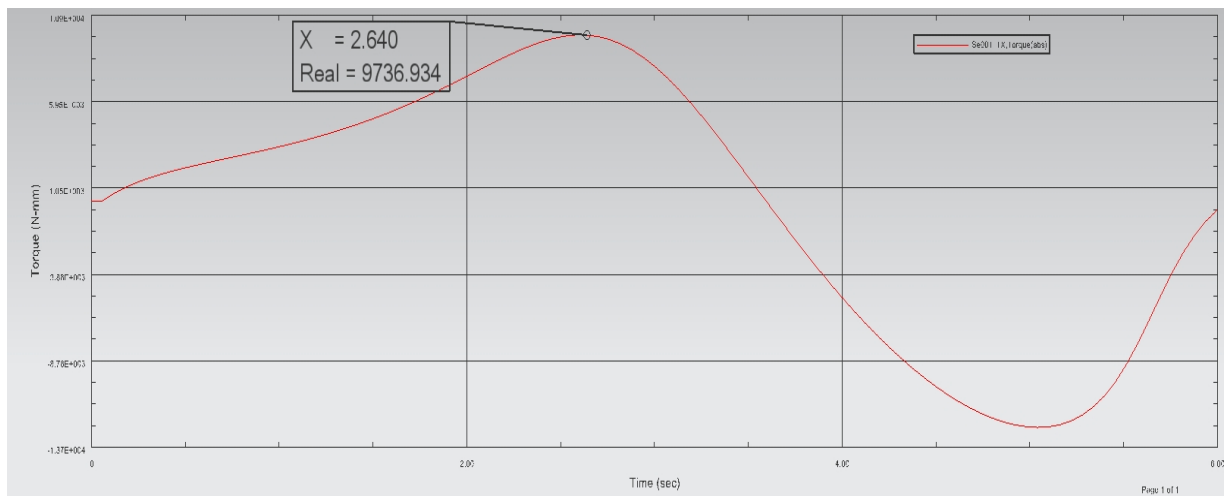


Figura 6.63. Gràfica del parell màxim real del motor [N.mm] respecte al temps aplicant la força a 24°. [Autor]

El resultat de la gràfica de la figura 6.63 tan sols en serveix el punt de 2,64 segons (angle d'atac de 24°). En aquest punt determinem el parell màxim que necessitem que ens proporcioni el servomotor i aquest és de 9,736 Nm com a mínim.

Un cop obtingut el parell màxim necessari procedim a determinar el motor. Per el fet que el parell és relativament alt hem optat per muntar un doble circuit idèntic a cada banda de l'aleró. Amb aquest fet hauriem de muntar dos motors però aquests serien més petits.

El punt beneficiós de muntar doble motor és que el parell motor es dividirà entre els dos motors.

Descripción	Motor de engranajes DC Parvalux PM4-0091/CONT, Con escobillas, 12 V dc, 5,9 Nm, 50 rpm, 90 W	Motor de engranajes DC Crouzet 82 867 001, Con escobillas, 12 V dc, 5 Nm, 344 rpm, 3 W	Motor de engranajes DC Crouzet 82867003, Con escobillas, 12 V dc, 5 Nm, 103 rpm, 3 W	Motor de engranajes DC Crouzet 82867006, Con escobillas, 12 V dc, 5 Nm, 8,6 rpm, 3 W	Motor de engranajes DC Crouzet 80835014, Con escobillas, 12 V dc, 5 Nm, 73 rpm, 27 W	Motor de engranajes DC Crouzet 80835015, Con escobillas, 12 V dc, 5 Nm, 47 rpm, 27 W	Motor de engranajes DC DOGA, 12 V dc, 5 Nm, 40 rpm, 20 W	Motor de engranajes DC DOGA 319.4846.20.00, Con escobillas, 12 V dc, 4 Nm, 40 Nm, 100 rpm
	 718-565 Vista rápida	 178-5049 Vista rápida	 178-5061 Vista rápida	 178-5106 Vista rápida	 224-3647 Vista rápida	 224-3653 Vista rápida	 380-8633 Vista rápida	 773-6793 Vista rápida
Fabricante	Parvalux	Crouzet	Crouzet	Crouzet	Crouzet	Crouzet	DOGA	DOGA
Referencia de fabricante	PM4-0091/CONT	82 867 001	82867003	82867006	80835014	80835015	-	319.4846.20.00
Info. téc.								
Construcción de la Bobina	-	Núcleo de Hierro	Núcleo de Hierro	Núcleo de Hierro	Núcleo de Hierro	Núcleo de Hierro	-	Núcleo de Hierro
Profundidad	121mm	79.8mm	79.8mm	79.8mm	142.5mm	142.5mm	100.6mm	122.7mm
Tipo de Cabezal de Engranajes	Cilíndrico con tornillo sin fin	Cilíndrico	Cilíndrico	Cilíndrico	Cilíndrico	Cilíndrico	Cilíndrico con tornillo sin fin	Cilíndrico con tornillo sin fin
Diámetro del Eje	12mm	8mm	8mm	8mm	8mm	8mm	-	12mm
Tensión de Alimentación	12 V dc	12 V dc	12 Vdc	12 Vdc	12 Vdc	12 Vdc	12 Vdc	12 V dc
Corriente Nominal	-	-	-	-	3,6 A	3,6 A	5 A	6 A, 60 A
Longitud	192mm	65mm	65mm	65mm	65.1mm	65.1mm	178mm	206.5mm
Dimensiones	192 x 55,5 x 121 mm	65 x 65 x 79,8 mm	65 x 65 x 79,8 mm	65 x 65 x 79,8 mm	65,1 x 65,1 x 142,5 mm	65,1 x 65,1 x 142,5 mm	178 x 60 x 100,6 mm	206,5 x 60 x 122,7 mm
Tipo de Motor DC	Con escobillas	Con escobillas	Con escobillas	Con escobillas	Con escobillas	Con escobillas	-	Con escobillas
Velocidad de Salida	50 rpm	344 rpm	103 rpm	8,6 rpm	73 rpm	47 rpm	40 rpm	100 rpm
Anchura	55.5mm	65mm	65mm	65mm	65.1mm	65.1mm	60mm	60mm
Par de Salida Máximo	5,9 Nm	5 Nm	5 Nm	5 Nm	5 Nm	5 Nm	5 Nm	4 Nm, 40 Nm

Figura 6.64. Comparativa de motors amb característiques similars entre 4-6 Nm de parell motor màxim [20]

Observant la comparativa de la figura 6.64 podem simplificar el nombre de motors de la figura aplicant el criteri de que les dimensions han de ser les mínimes (Figura 6.68).


Descripción	Motor de engranajes DC Crouzet 82 867 001, Con escobillas, 12 V dc, 5 Nm, 344 rpm, 3 W	Motor de engranajes DC Crouzet 82867003, Con escobillas, 12 V dc, 5 Nm, 103 rpm, 3 W	Motor de engranajes DC Crouzet 82867006, Con escobillas, 12 V dc, 5 Nm, 8,6 rpm, 3 W
	 178-5049 Vista rápida	 178-5061 Vista rápida	 178-5106 Vista rápida
Fabricante	Crouzet	Crouzet	Crouzet
Referencia de fabricante	82 867 001	82867003	82867006
Info. téc.			
Construcción de la Bobina	Núcleo de Hierro	Núcleo de Hierro	Núcleo de Hierro
Profundidad	79.8mm	79.8mm	79.8mm
Tipo de Cabezal de Engranajes	Cilíndrico	Cilíndrico	Cilíndrico
Diámetro del Eje	8mm	8mm	8mm
Tensión de Alimentación	12 V dc	12 Vdc	12 Vdc
Longitud	65mm	65mm	65mm
Potencia Nominal	3 W	3 W	3 W
Dimensiones	65 x 65 x 79.8 mm	65 x 65 x 79.8 mm	65 x 65 x 79.8 mm
Tipo de Motor DC	Con escobillas	Con escobillas	Con escobillas
Velocidad de Salida	344 rpm	103 rpm	8.6 rpm
Anchura	65mm	65mm	65mm
Par de Salida Máximo	5 Nm	5 Nm	5 Nm
Categoría	Motores d.c. con Caja Reductora	Motores d.c. con Caja Reductora	Motores d.c. con Caja Reductora

Figura 6.65. Comparativa de motors amb les mateixes característiques però diferents velocitats. [20]

Un altre dels punts importants per la determinació del motor és la velocitat de funcionament. Actualment ens trobem amb aquests tres models amb unes velocitats de sortida de 344, 103, 8.6 rpm.

En el nostre cas la velocitat que s'aproxima més a la necessitada és el de 8.6 rpm.

$$8.6 \text{ rpm} = 0.1433 \text{ rps}$$

$$\frac{0.1433 \text{ rev}}{1 \text{ s}} = \frac{x \text{ rev}}{6 \text{ s}} \rightarrow x = \frac{6 \text{ s} * 0.1433 \text{ rev}}{1 \text{ s}} = \boxed{0.86 \text{ rev}}$$

Per donar una volta completa amb aquest motor trigaria un temps de:

$$\frac{0.1433 \text{ rev}}{1 \text{ s}} = \frac{1 \text{ rev}}{x \text{ s}} \rightarrow x = \frac{1 \text{ s} * 1 \text{ rev}}{0.1433 \text{ rev}} = \boxed{6.98 \text{ segons}}$$

Finalment determinem que utilitzant aquest motor (Crouzet 82867006) el temps total per fer una volta completa és de 6.98 segons. [Annex 3] Aproximadament 1 segon més del temps calculat, essent totalment admissible.

6.3.2.1.2. Viabilitat de funcionament.

Comprovem la viabilitat de funcionament del sistema implementant una velocitat fixa de 130km/h utilitzada com a referència a tot l'estudi, i variant l'angle d'inclinació des de la posició mínima a la màxima.

“DRS” amb angle d'atac mínim

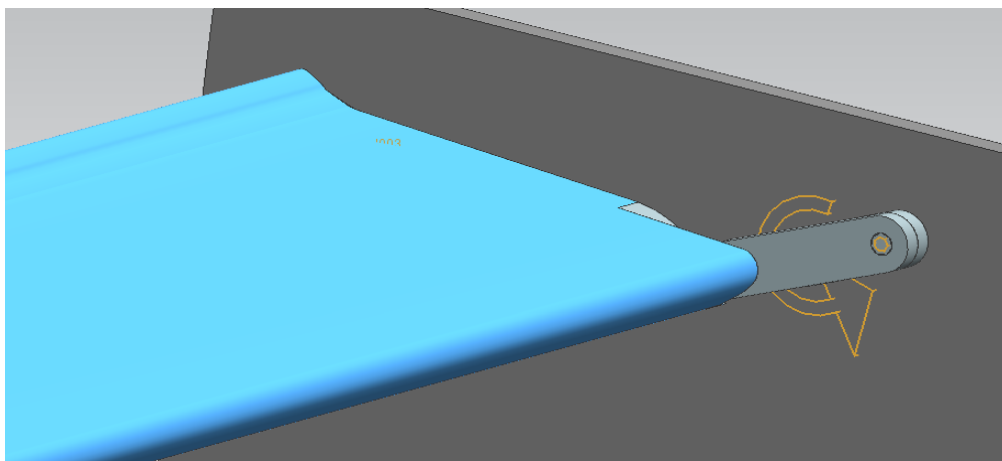


Figura 6.66. Esquema del perfil “DRS” amb angle d'atac mínim de 0°. [Siemens NX]

Calculem el conjunt de l'aleró posterior amb l'angle d'atac en la posició mínima i màxima.

Taula 6.9. Resum dels resultats 3D de l'aleró posterior amb el “DRS” amb l'angle mínim.

Velocitat (km/h)	0 angle atac	Mach	Reynolds	C _L /C _D	C _L	C _D	F _L (N)	F _D (N)
130,0	0	0,1061	386795,44	3,91	0,9898	0,2636	175,12	46,63

“DRS” amb angle d'atac màxim

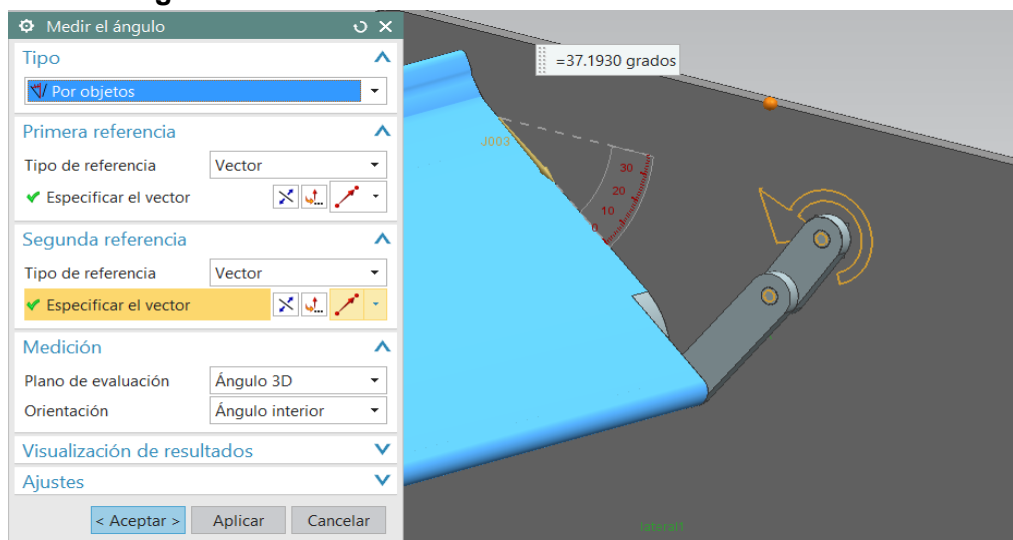


Figura 6.67. Esquema del perfil “DRS” amb angle d'atac màxim de 37.19° [Siemens NX]

Taula 6.10. *Resum dels resultats 3D de l'aleró posterior amb el "DRS" amb l'angle màxim.*

Velocitat (km/h)	° angle atac	Mach	Reynolds	C_L/C_D	C_L	C_D	F_L (N)	F_D (N)
130,0	37.19	0,1061	386795,44	2,61	1,742	0,667	308,87	118,5

Observant la taula 6.10. podem deduir que a un angle màxim de 37.19° que ens proporciona el sistema "DRS" variable obtenim un valor de càrrega aerodinàmica inferior que a 12° que és el seu punt òptim de funcionament.

A partir dels valors podríem dissenyar un programa electrònic per aconseguir optimitzar els paràmetres segons les característiques de cada cursa. Aquest fet ens donaria pas a realitzar un altre treball que no es troba dins dels objectius contemplats en el present TFG.

6.3.3. Resultats de la simulació numèrica dels alerons modificats.

Taula 6.11. *Resum resultats de la simulació numèrica dels alerons modificats amb el DRS a 12°.*

	Aleró davanter		Aleró posterior		Total	
Velocitat (km/h)	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)
60,0	56,05	13,96	72,62	18,92	128,67	32,88
70,0	76,37	18,74	99,41	26,16	175,78	44,9
80,0	99,87	24,94	129,91	34,17	229,78	59,11
90,0	126,69	31,42	164,54	42,82	291,23	74,24
100,0	156,59	38,78	203,19	52,34	359,78	91,12
110,0	189,70	46,82	246,05	63,21	435,75	110,03
120,0	223,40	55,74	292,98	75,07	516,38	130,81
130,0	264,64	64,93	343,93	87,93	608,57	152,86
140,0	307,64	75,48	398,98	101,98	706,62	177,46
150,0	353,57	86,53	458,36	116,83	811,93	203,36
160,0	403,21	98,40	521,92	132,79	925,13	231,19
170,0	456,24	111,14	589,50	149,76	1045,74	260,9
180,0	512,09	124,48	675,31	167,55	1187,4	292,03

A partir de la simulació numèrica dels alerons obtenim una càrrega aerodinàmica d'anti-sustentació total a 130km/h i amb DRS de 12° de 608.57 N i una càrrega d'arrossegament de 152.86 N.

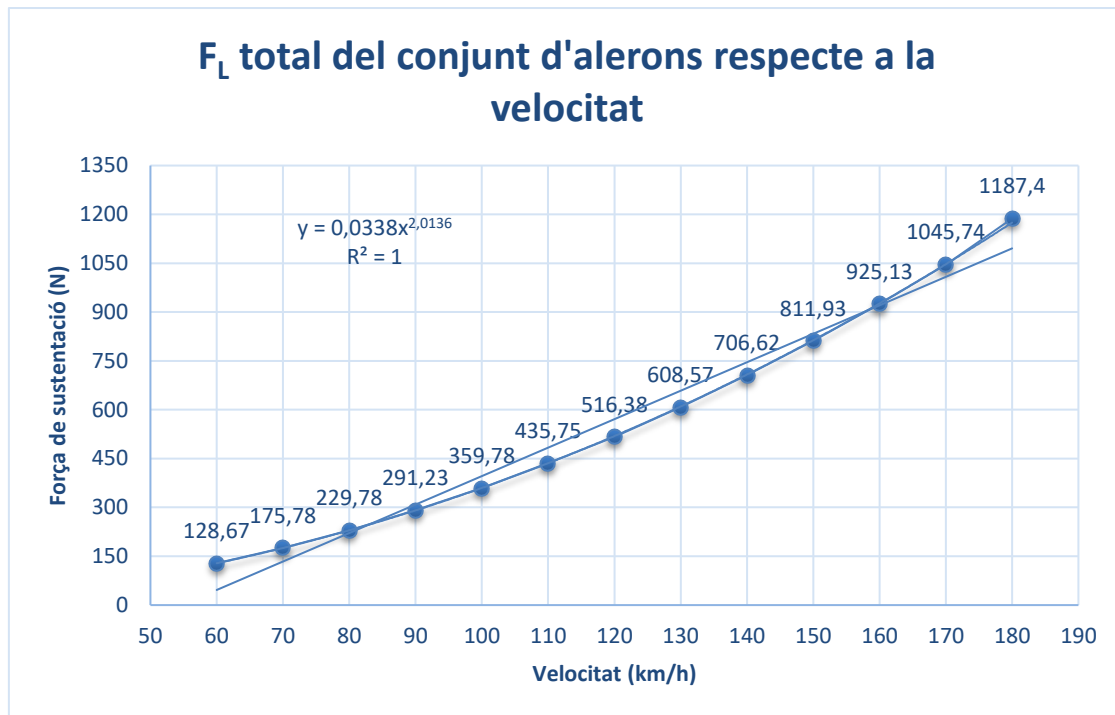


Figura 6.68. Tendència de la força de sustentació 3D (F_L) total del conjunt d'alerons modificats en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

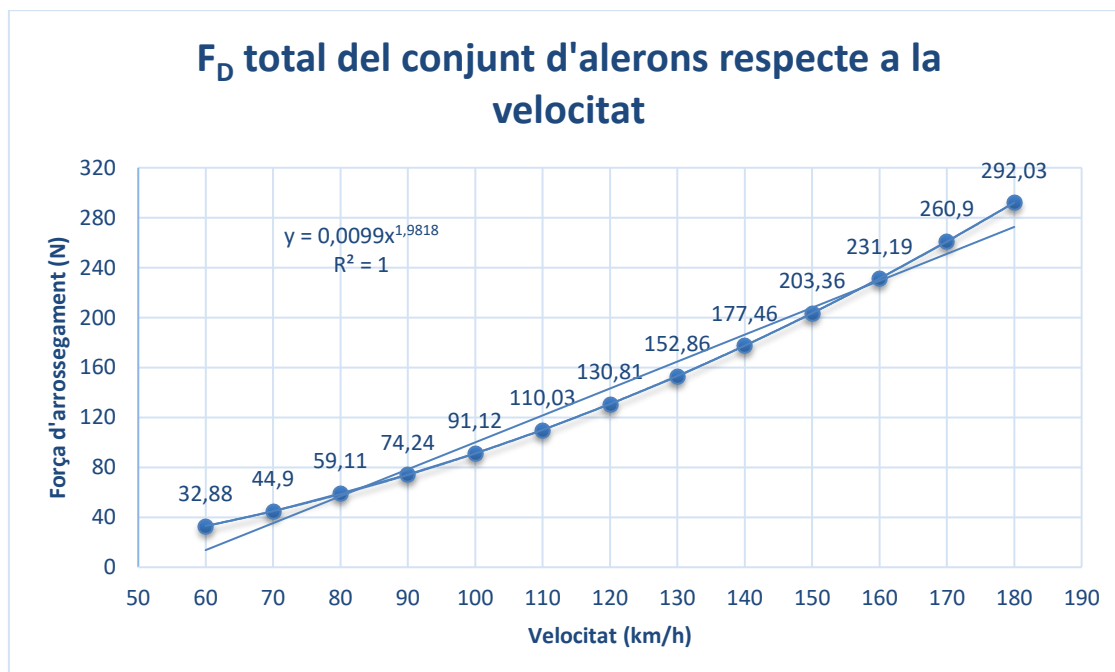


Figura 6.69. Tendència de la força d'arrossegament 3D (F_D) total del conjunt d'alerons modificats en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

6.4. Comparativa dels resultats de la simulació numèrica entre els alerons actuals i els modificats.

Taula 6.12. Comparativa dels resultats de la simulació numèrica entre els alerons actuals i els modificats.

	Alerons actuals		Alerons modificats		Increment de càrregues	
Velocitat (km/h)	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)	ΔF_L (N)	ΔF_D (N)
60,0	97,88	20,42	128,67	32,88	30,79	12,46
70,0	133,51	28,30	175,78	44,9	42,27	16,6
80,0	174,69	36,96	229,78	59,11	55,09	22,15
90,0	221,52	46,76	291,23	74,24	69,71	27,48
100,0	273,96	57,73	359,78	91,12	85,82	33,39
110,0	331,94	69,84	435,75	110,03	103,81	40,19
120,0	395,57	83,11	516,38	130,81	120,81	47,7
130,0	464,87	97,57	608,57	152,86	143,7	55,29
140,0	539,87	113,12	706,62	177,46	166,75	64,34
150,0	620,96	129,61	811,93	203,36	190,97	73,75
160,0	707,88	147,70	925,13	231,19	217,25	83,49
170,0	799,74	166,65	1045,74	260,9	246	94,25
180,0	898,14	186,56	1187,4	292,03	289,26	105,47

A partir de la simulació numèrica dels alerons obtenim un increment de càrrega aerodinàmica total a 130 km/h d'anti-sustentació de 143.7 N i una càrrega d'arrossegament de 55.29 N.

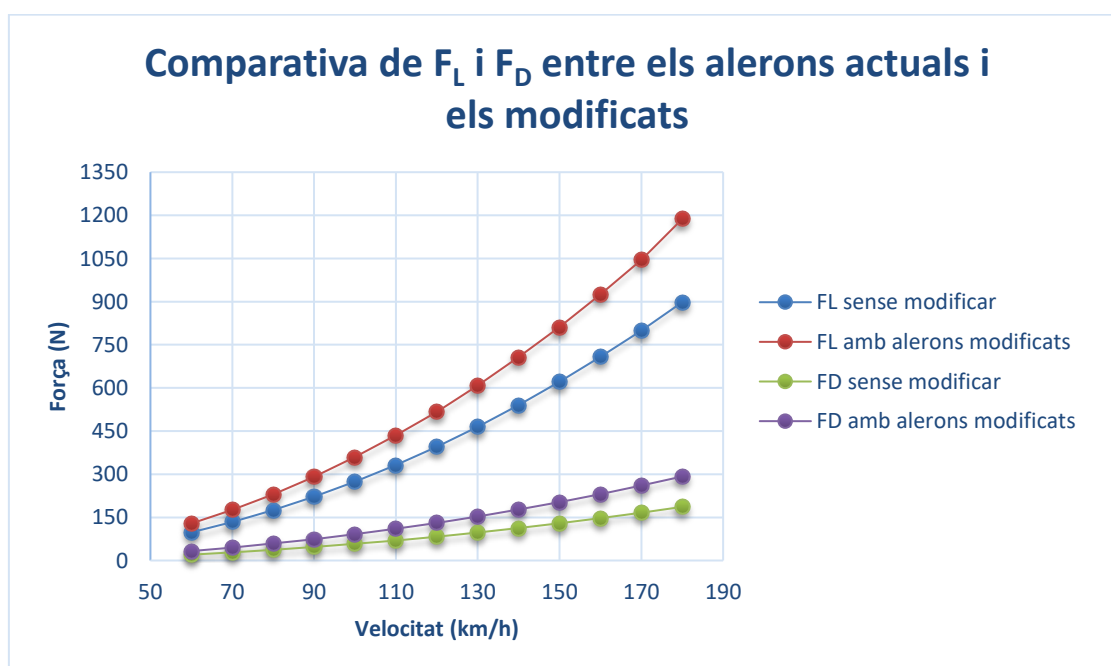


Figura 6.70. Comparativa de les forces aerodinàmiques (F_L i F_D) dels alerons actuals i els modificats respecte de la velocitat del monoplaça. [Autor]

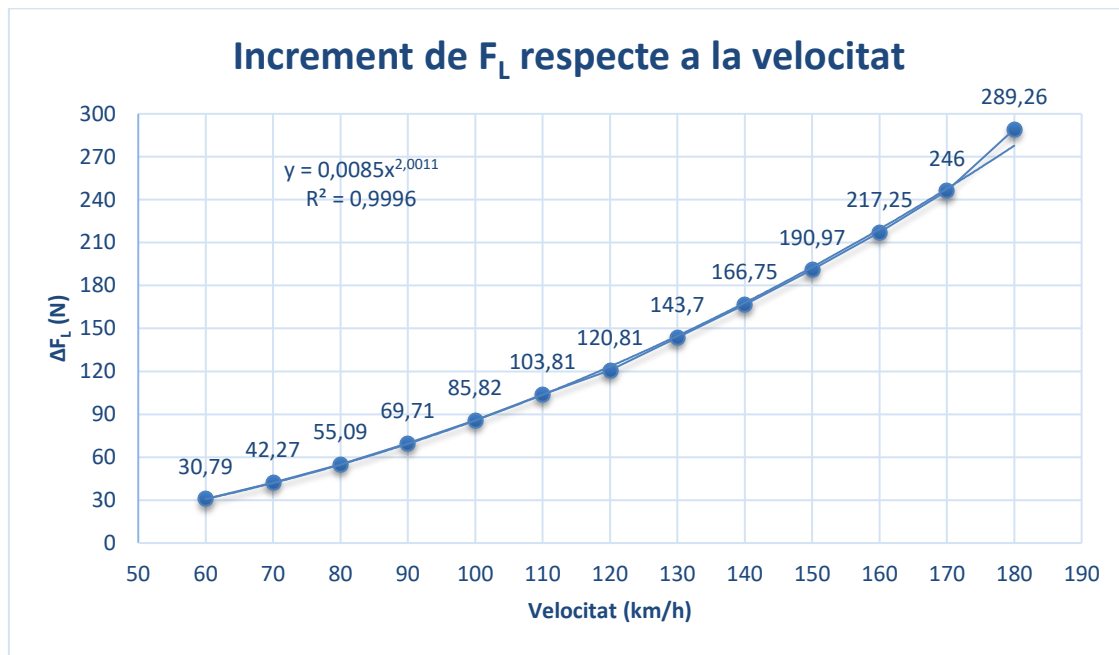


Figura 6.71. Tendència de l'increment de la força de sustentació 3D (F_L) total entre els alerons actuals i els modificats en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

A partir de la figura 6.70 obtenim les figures 6.71 i 6.72, que representen l'increment de les forces aerodinàmiques (F_L i F_D).

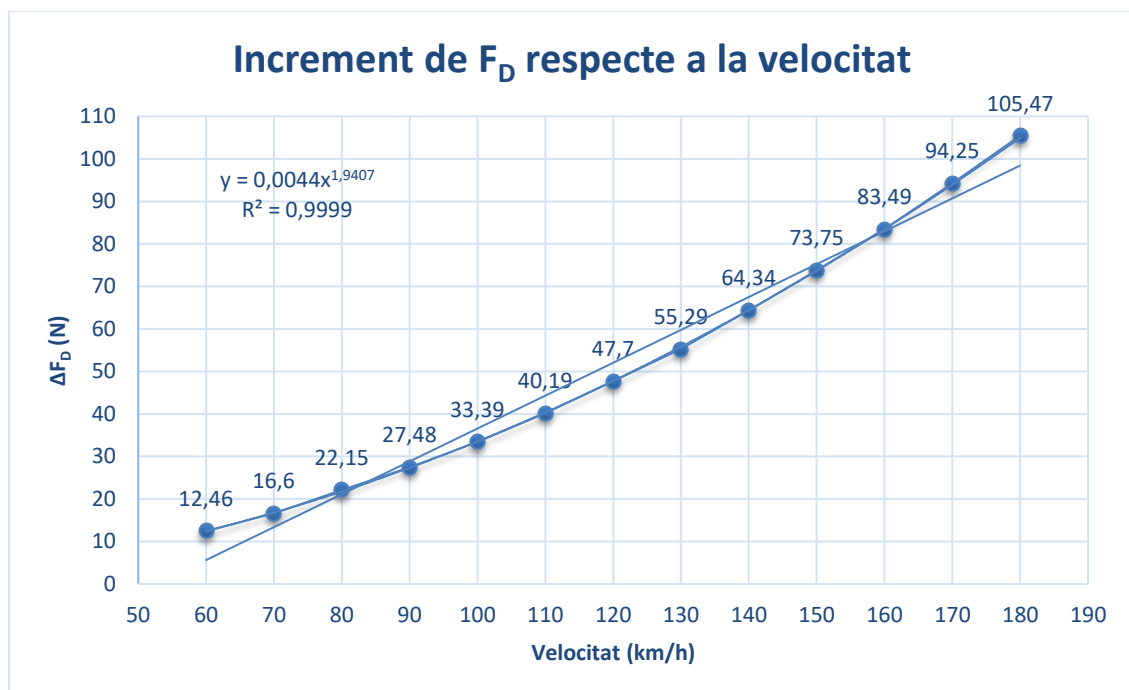


Figura 6.72. Tendència de l'increment de la força d'arrossegament 3D (F_D) total entre els alerons actuals i els modificats en relació a la velocitat del monoplaça. [Autor]

6.5. Estudi mecànic

L'estudi mecànic dels alerons és necessari per saber si els suports que trobem en el monoplaça per l'acollat d'aquests, sotmesos al cas més crític de càrregues, és suficient. A més realitzem un dimensionat dels cargols.

6.5.1. Aleró davanter

Un cop obtinguts els valors de les càrregues degudes a l'estudi bidimensional i l'estudi tridimensional influents en l'aleró davanter, observem que les càrregues teòriques bidimensionals (obtingudes amb el software XFLR5 i el coeficients C_D i C_L 2D) són superior a les càrregues obtingudes amb l'estudi tridimensional com veiem en la taula 6.13.

Taula 6.13. Comparativa de càrregues aerodinàmiques del l'aleró davanter en 2D i 3D

Velocitat (m/s)	2D		3D	
	F_L (N)	F_D (N)	F_L (N)	F_D (N)
60,0	64,03	0,64	38,34	6,85
70,0	87,95	0,78	52,26	9,30
80,0	114,97	0,99	68,36	12,14
90,0	145,58	1,22	86,78	15,34
100,0	179,81	1,46	107,30	18,92
110,0	217,77	1,75	130,03	22,88
120,0	259,86	2,06	154,98	27,20
130,0	304,98	2,39	182,16	31,93
140,0	354,02	2,74	211,58	37,00
150,0	407,50	3,11	243,62	41,99
160,0	464,06	3,50	278,02	47,74
170,0	524,35	3,90	313,86	53,80
180,0	588,38	4,21	352,40	60,05

Com observem en la taula 6.13 la força resultant major aplicada sobre el suports és la calculada a l'estudi bidimensional però això en centrem amb aquesta.

La part que pateix una major tensió és on hi ha els suports per sustentar l'aleró. Per realitzar l'estudi necessitem assignar-li el material amb el qual està fabricat que en el nostre cas la part central de l'aleró és de fibra de carbono i la les aletes que serveixen de suport són d'alumini. Aquestes aletes exteriors van unides al perfil mitjançant perns.

Les parts que conformen l'aleró són bàsicament tres:

- El perfil alar que és de fibra de carbono.
- Les platines de suport que són d'alumini.
- Les platines exteriors que són de planxa d'acer.

A l'hora d'assignar-li el material a les peces ens trobem que la fibra de carbono no es troba en la llibreria de Siemens NX 10 i per això hem de procedir a agregar-lo, introduint els paràmetres manualment.

La fibra de carbono.

És una fibra sintètica que té propietats mecàniques similars a l'acer i és tan lleugera com el plàstic. Respecte a la seva duresa, té una major resistència a l'impacte que l'acer. Com la majoria de les fibres, el mode d'ús és juntament amb resines de tipus epòxid o similars.

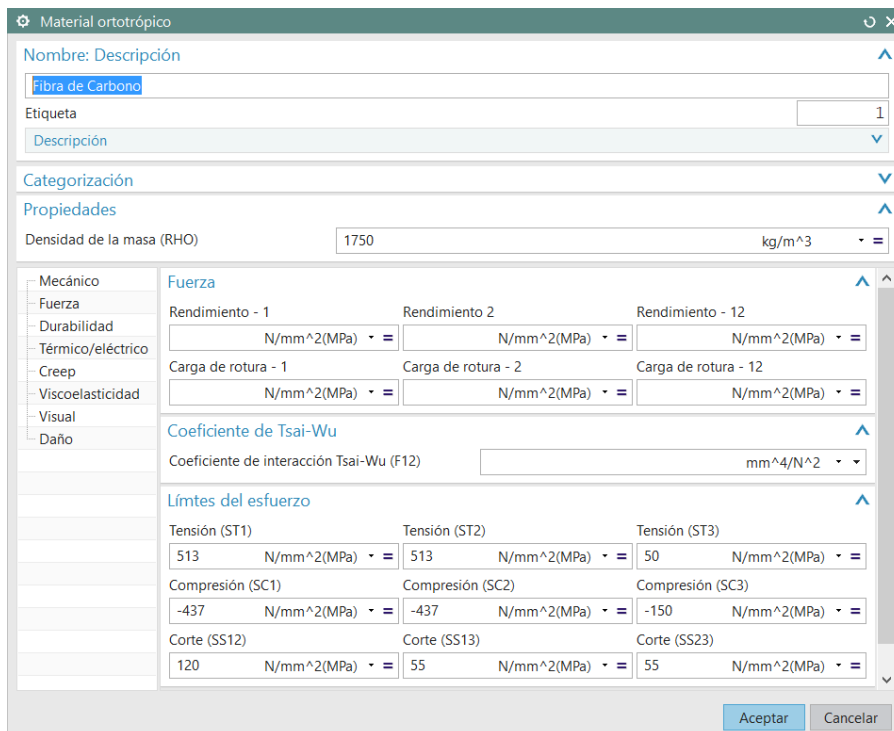
Aquestes fibres es poden classificar segons el valor del seu mòdul de Young:

- SM "Standard modulus".
- UHM "Ultra-high modulus".
- HM "High modulus".
- HT "High tenacity-high strength".
- LM "Low modulus".

Taula 6.14. Propietats de la fibra de carbono

	Fibra SM	Fibra HT	Fibra HM
Contingut en carbono (%)	95	95	>99
Diàmetre de la fibra (μm)	6 -- 8	5 -- 6	5 -- 8
Densitat lineal (gtm)	1,8	1,8	1,9
Mòdul de Young (Gpa)	228	290 -- 241	345 -- 448
Resistència a la tracció (Mpa)	3800	3450 -- 6200	3450 -- 5520
Allargament a la ruptura (%)	1,6	1,3 -- 2	0,7 -- 1

Per poder agregar-lo cal conèixer les propietats mecàniques de la fibra de carbono com veiem en la taula 6.14. Per obtenir aquestes propietats utilitzem el programari ANSYS que és un altre programa de simulació CAD/CAE però que en la seva base de dades es troben les característiques de la fibra de carbono. Nosaltres ens centrarem en la fibra estàndard.



Material ortotrópico

Nombre: Descripción

Etiqueta: 1

Descripción

Categorización

Propiedades

Densidad de la masa (RHO): 1750 kg/m³

Mecánico

Fuerza

Rendimiento - 1: N/mm²(MPa) =

Rendimiento 2: N/mm²(MPa) =

Rendimiento - 12: N/mm²(MPa) =

Carga de rotura - 1: N/mm²(MPa) =

Carga de rotura - 2: N/mm²(MPa) =

Carga de rotura - 12: N/mm²(MPa) =

Coefficiente de Tsai-Wu

Coefficiente de interacción Tsai-Wu (F12): mm⁴/N² =

Límites del esfuerzo

Tensión (ST1): 513 N/mm²(MPa) =

Tensión (ST2): 513 N/mm²(MPa) =

Tensión (ST3): 50 N/mm²(MPa) =

Compresión (SC1): -437 N/mm²(MPa) =

Compresión (SC2): -437 N/mm²(MPa) =

Compresión (SC3): -150 N/mm²(MPa) =

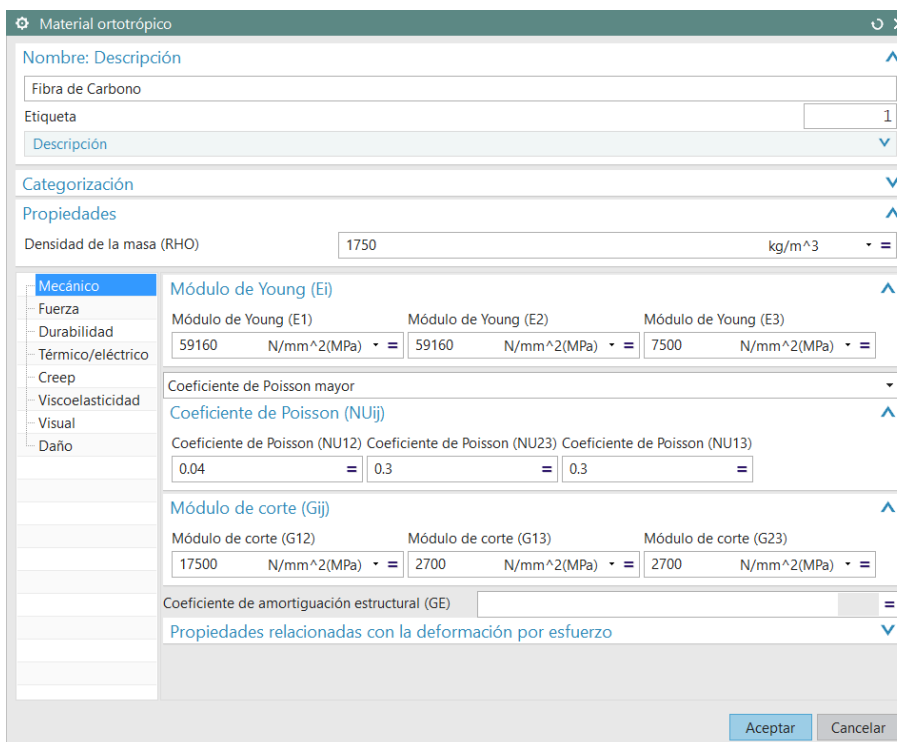
Corte (SS12): 120 N/mm²(MPa) =

Corte (SS13): 55 N/mm²(MPa) =

Corte (SS23): 55 N/mm²(MPa) =

Aceptar Cancelar

Figura 6.73. Configuració dels paràmetres de força de la fibra de carboni.
[Siemens NX]



Material ortotrópico

Nombre: Descripción

Etiqueta: 1

Descripción

Categorización

Propiedades

Densidad de la masa (RHO): 1750 kg/m³

Mecánico

Módulo de Young (Ei)

Módulo de Young (E1): 59160 N/mm²(MPa) =

Módulo de Young (E2): 59160 N/mm²(MPa) =

Módulo de Young (E3): 7500 N/mm²(MPa) =

Coefficiente de Poisson mayor

Coefficiente de Poisson (NUij)

Coefficiente de Poisson (NU12): 0.04 =

Coefficiente de Poisson (NU23): 0.3 =

Coefficiente de Poisson (NU13): 0.3 =

Módulo de corte (Gij)

Módulo de corte (G12): 17500 N/mm²(MPa) =

Módulo de corte (G13): 2700 N/mm²(MPa) =

Módulo de corte (G23): 2700 N/mm²(MPa) =

Coefficiente de amortiguación estructural (GE): =

Propiedades relacionadas con la deformación por esfuerzo

Aceptar Cancelar

Figura 6.74. Configuració dels paràmetres mecànics de la fibra de carboni.
[Siemens NX]

Contador de objeto (3)
Volumen=10849261.4336 mm³
Área=998930.7173 mm²
Masa=12.3950 kg
Peso=121.5537 N

Figura 6.75. Característiques principals de l'aleró davanter. [Siemens NX]

Un cop determinats els materials de l'aleró, obtenim un massa aproximada de 12.40Kg i un pes de 121.55N.

Per el càlcul mecànic de l'aleró ens centrem en fer el dimensionat dels passadors perquè puguin sostenir l'aleró i les seves forces.

Les forces influents en ell, són el seu propi pes ($P = 121.55\text{N}$), i les càrregues variables degudes a les forces d'arrossegament i d'anti-sustentació produïdes per la velocitat del monoplaça envers el flux continu d'aire.

Mallat de l'aleró.

El mallat el realitzem amb una malla tetraèdrica.

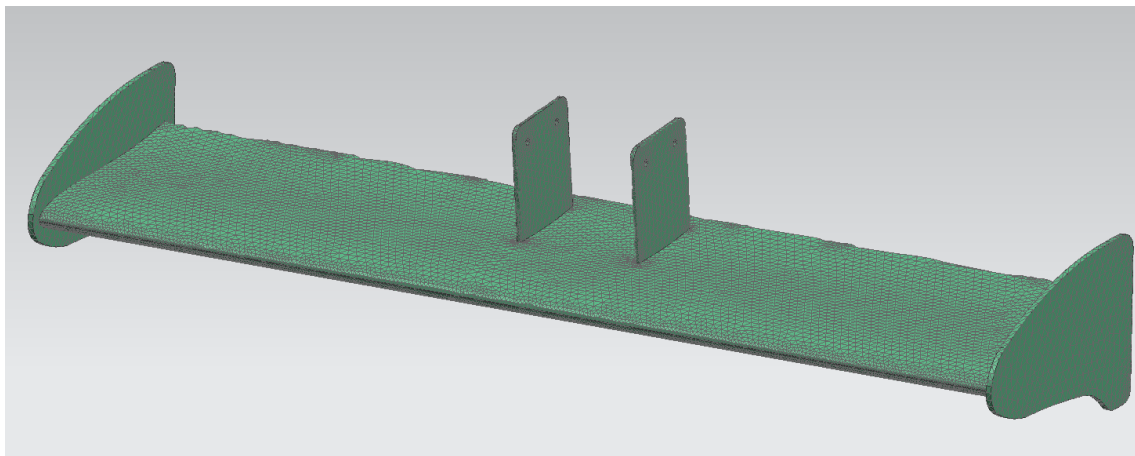


Figura 6.76. Mallat de l'aleró davanter. [Siemens NX]

Quan tenim el mallat general com veiem en la figura 33, hem de realitzar un mallat més fi al voltant dels punts crítics i per fer-ho dividim el perímetre dels forats en divisions de 2mm com veiem en la figura 6.76.

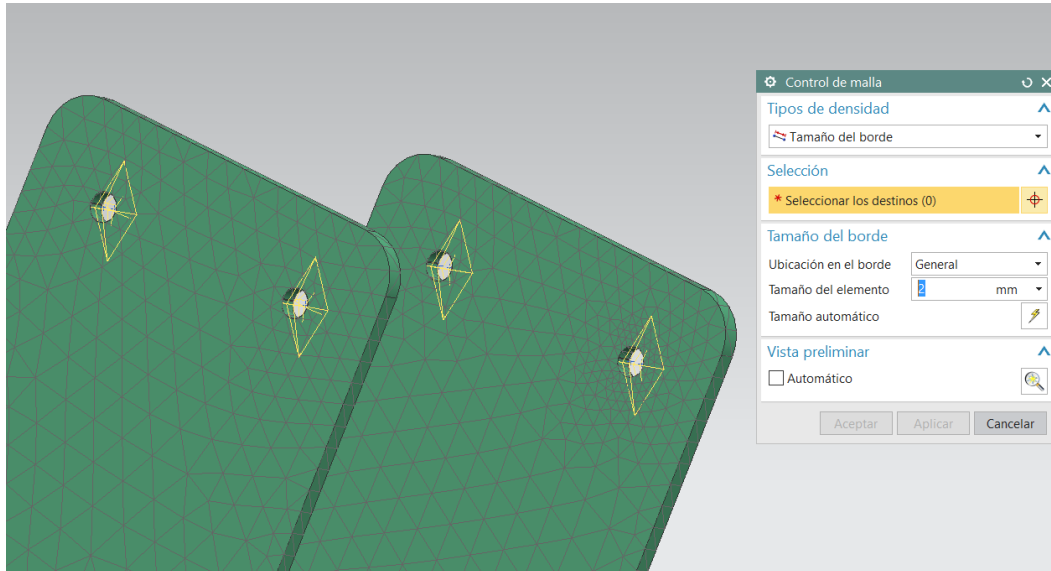


Figura 6.77. Afinament del mallat al voltant dels punts crítics. [Siemens NX]

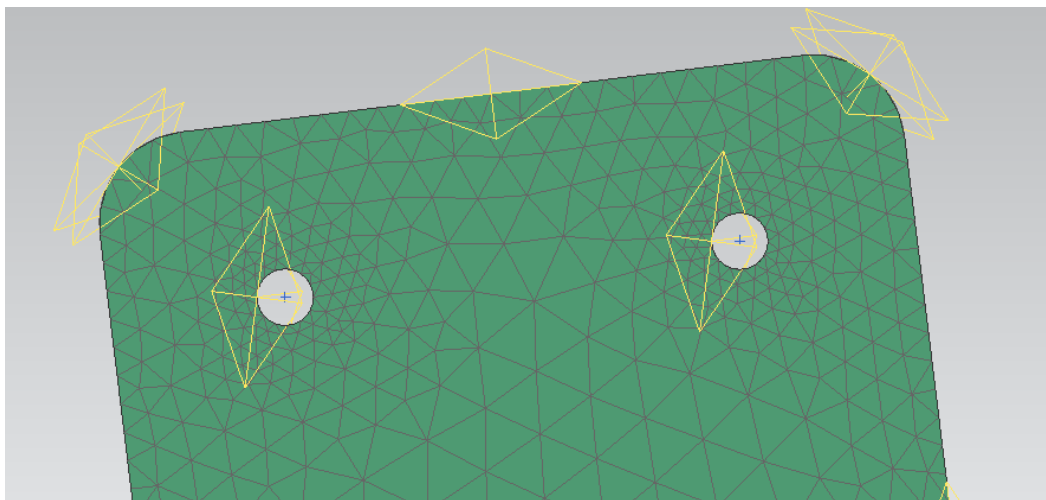


Figura 6.78. Mallat final de la part crítica de l'aleró. [Siemens NX]

Distribució de les forces aplicades.

Un cop finalitzat el mallat de la part crítica com veiem en la figura 6.78, apliquem les càrregues que suporta l'aleró en el cas més crític que serien quan el monoplaça va a la velocitat màxima $V = 180 \text{ km/h}$.

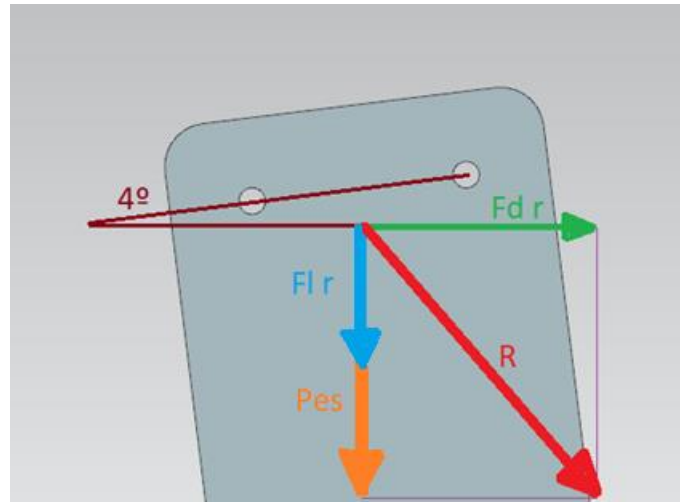


Figura 6.79. Esquema qualitatiu de la distribució de les forces aplicades. [Autor]

Com veiem en la figura 5.79, els passadors suporten una càrrega resultant “ \vec{R} ” fruit de la càrrega Pes “ \vec{P} ” + la Força d’anti-sustentació “ $\vec{Fl\ r}$ ” i la força d’arrossegament “ $\vec{Fd\ r}$ ”

Per fer els càlculs i la dimensió dels 4 passadors ens centrem en el cas més crític que seria quan la velocitat fos la velocitat màxima que pot assolir el monoplaça $V_{max} = 50\text{ m/s}$. En aquest cas les forces d’arrossegament i anti-sustentació implicades serien les calculades anteriorment;

- Càrrega degut al propi pes $P = 121.55\text{ N}$
- Càrrega d’arrossegament $F_D = 4.21\text{ N}$
- Càrrega d’anti-sustentació $F_L = 588.38\text{ N}$

En definitiva els passadors hauríem de suportar una càrrega tallant total de

$$\vec{R} = \vec{P} + \vec{Fl\ r} + \vec{Fd\ r} = \sqrt{(121.55 + 588.38)^2 + 4.21^2} = \boxed{709.94\text{ N}}$$

Un cop determinada la càrrega total resultant aplicada a l’aleró, hem de cercar el centre de masses global per la seva aplicació. Per cercar-lo utilitzem l’eina que ens proporciona el programa XFLR5 com veiem en la figura 5.80 per obtenir els paràmetres de les pressions resultants i el seu punt d’aplicació de la peça estudiada.

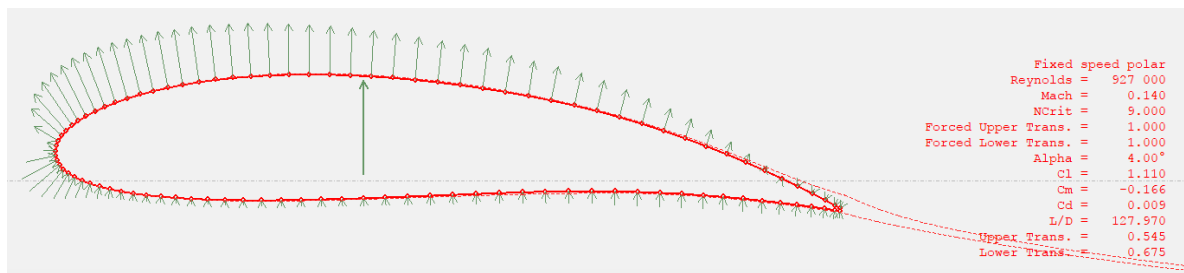


Figura 6.80. Esquema qualitatiu de les pressions resultants i el seu punt d’aplicació.
[XFLR5]

La posició del punt d'aplicació de la resultant és; $(0.394, 0.008) \Rightarrow (110.32, 2.24)$ mm. Aquestes mesures seran les que utilitzarem per l'aplicació de les càrregues del nostre model.

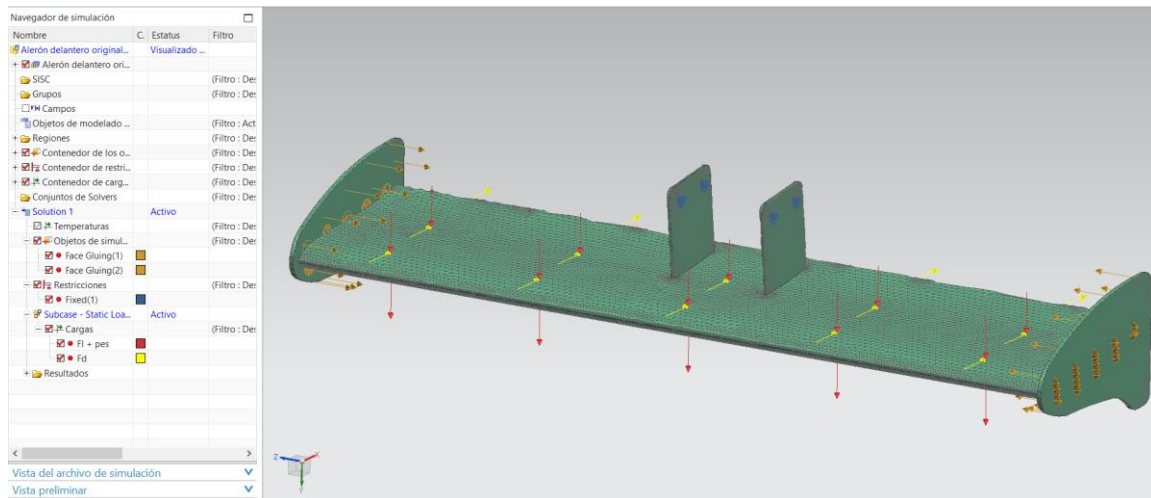


Figura 6.81. Aplicació de les càrregues aerodinàmiques. [Siemens NX]

Un cop hem aplicat totes les forces que intervenen, procedim a solucionar el sistema amb l'opció de l'NX Nastran FEM. Les dades importants de la solució seria el desplaçament vertical en "Y" com veiem en la figura 6.82 i els esforços originats en els punts crítics.

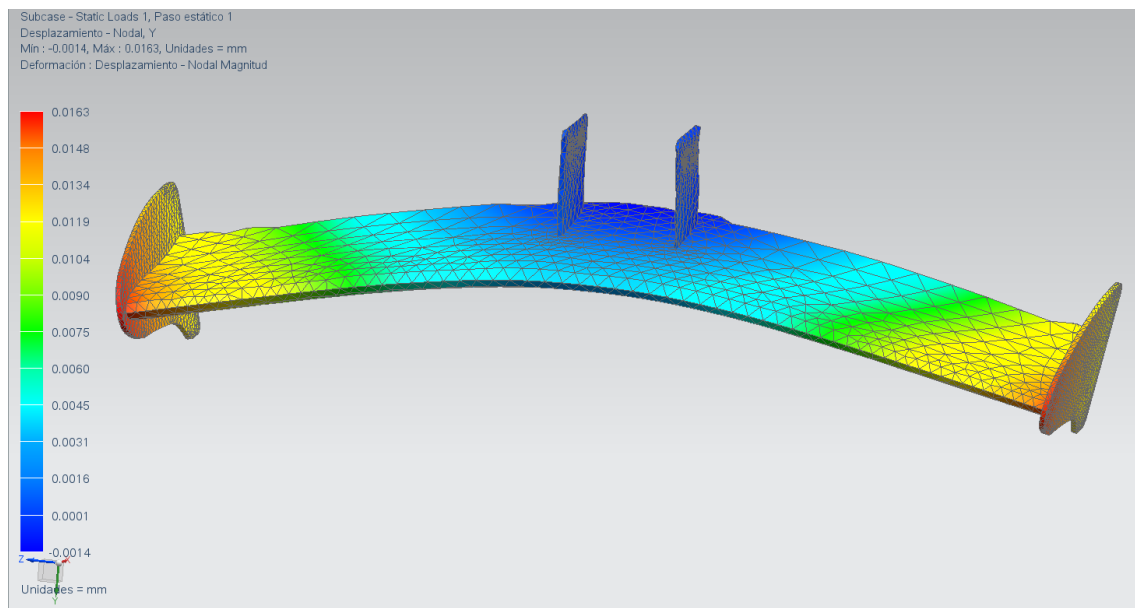


Figura 6.82. Desplaçament vertical en "Y". [Siemens NX]

Observem en la figura anterior que el desplaçament màxim que pateix l'aleró davanter és de 0.0163 mm situat en els extrems.

Pel que fa als esforços, podem observar en la figura 6.82 que degut als 4º d'inclinació la platina de suport treballa per la part de baix sotmesa a tracció i la part de dalt comprimida.

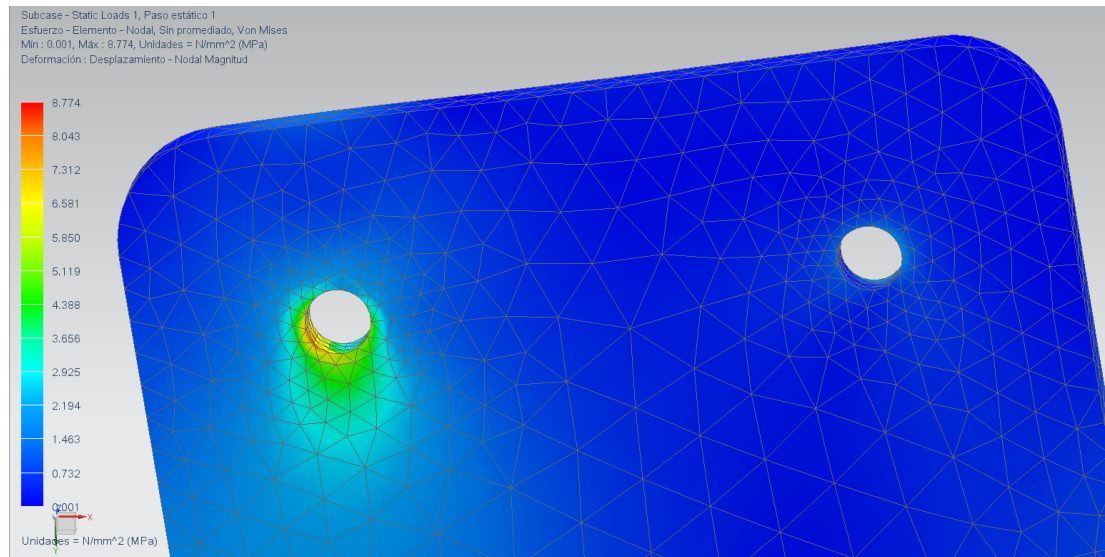


Figura 6.83. Representació del l'esforç de von misses. [Siemens NX]

Obtingut un valor de Von Mises de 8.774MPa en el punt més crític a partir del programa, el contrarestem amb el càlcul teòric.

Taula 6.15. Dades de les tensions en el punt més sol·licitat.

σ			τ		
XX	YY	ZZ	XY	YZ	ZX
-1,77	7,39	1,80	-2,19	0,41	-0,6

Si apliquem l'equació general de Von Mises;

$$VM = \sqrt{\sigma_{xx}^2 + \sigma_{yy}^2 + \sigma_{zz}^2 - (\sigma_{xx}\sigma_{yy} + \sigma_{yy}\sigma_{zz} + \sigma_{zz}\sigma_{xx}) + 3(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)}$$

Obtenim;

VM

$$= \sqrt{1.77^2 + 7.39^2 + 1.80^2 - (-1.77 * 7.39 + 7.39 * 1.80 - 1.80 * 1.77) + 3(2.19^2 + 0.41^2 + 0.6^2)}$$

$$VM_{teòric} = 8.84 MPa \cong 8.77 MPa$$

Confirmem que el valor obtingut és correcte.

Si determinem que l'alumini utilitzat té un límit elàstic de 85MPa, obtenim el coeficient de seguretat de les platines segons la teoria de fallada de la màxima energia de distorsió (TMED).

$$\sigma_{VM} \geq \sigma_{el}$$

$$\sigma_{VM} * FS = \sigma_{el}$$

$$FS = \frac{\sigma_{el}}{\sigma_{VM}} = \frac{85MPa}{8.84 MPa} = \boxed{9.62}$$

Aquest coeficient de seguretat és relativament elevat ja que nosaltres hem realitzat el càlcul a una velocitat màxima de 180km/h que és la velocitat que assoleix el monoplaça en aquests instants, en canvi el suport estava dissenyat per suportar velocitats majors i per conseqüència esforços majors. Aquest fet es deu a que el monoplaça va ser fabricat per competicions en circuits on requerien majors velocitats punta.

Procedirem a determinar les reaccions degudes a les càrregues a cada punt de subjecció per poder dimensionar el pern.

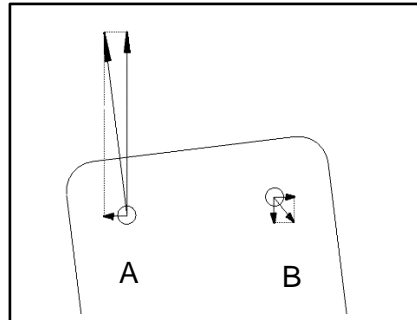


Figura 6.84. Esquema quantitatiu de les forces de reacció aplicades en els punts de collada. [Autor]

Taula 6.16. Reaccions calculades a partir del software NX.

Suport A (N)			Suport B (N)		
X	Y	Z	X	Y	Z
-45,29	-408	2,536	43,18	53,176	2,5

On el suport A admet un càrrega transversal de $Q_a = \sqrt{45.29^2 + 408^2} = 410.5 \text{ N}$

I el suport B admet una càrrega de $Q_b = \sqrt{43.18^2 + 53.176^2} = 68.5 \text{ N}$

Comprovació de les reaccions.

La suma de les reaccions obtingudes tindria que ser el mateix que les reaccions que s'apliquen al cos degut a les forces externes.

$$\sum F_x = 0 \rightarrow 4.21 (Fd) = 45.29 * 2 - 43.18 * 2 \rightarrow 4.21 \cong 4.22$$

$$\sum F_y = 0 \rightarrow 121.55 (P) + 588.38 (Fl) = 408 * 2 - 53.176 * 2 \rightarrow 709.94 \cong 709.65$$

Les reaccions en l'eix "Z" són produïdes per l'efecte de vinclament que pateix l'aleró en els seus extrems. Aquest fet repercuteix en els punts de subjecció. Com que el sumatori de forces ens resulta zero, podem afirmar que les reaccions obtingudes són correctes.

La càrrega total suportada per els 4 cargols i es reparteix per els cargols davanter (A) en $Q_a = 410.5 \text{ N}$ i pels cargols (B) $Q_b = 68.5 \text{ N}$.

Els cargols que estaran més sol·licitats seran els cargols "A" i procedirem a dimensionar-los. El fet de dimensionar tan sols aquests cargols i no suposar uns cargols inferiors als altres punts de collada és una qüestió de minoració en el procés de fabricació.

Calculem a partir de l'equació de disseny dels cargols;

$$\frac{F_m}{A_t} * 1.35 \leq \frac{\sigma_p}{FS}$$

On

- F_m és la força de muntatge (N)
- A_t és l'àrea total (mm²).

$$\circ A_t = \frac{\pi * d_t^2}{4}$$

i

$$d_t = d_{nominal} - 0.938194 * pas$$

- σ_p és la tensió del límit elàstic (N/mm²) del cargol utilitzat que podem obtenir de la taula 45.

Taula 6.17. Característiques mecàniques dels acers dels cargols, femelles i volanderes.

Clase	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
Tensión de límite elástico f_y (N/mm ²)	240	300	480	640	900
Tensión de rotura f_u (N/mm ²)	400	500	600	800	1000

- FS és el factor de seguretat que depèn;
 - Unions d'alta qualitat.
 - Rosca fina. FS = 1.25
 - Rosca normal. FS = 1.1
 - Unions de baixa qualitat. FS = 1.4

Proposem un cargol mètric M6x0.5 amb duresa 6.8 de rosca fina i calculem si ens és suficient.

- Càlcul de la força de muntatge.

Apliquem dades;

$$\frac{F_m}{\frac{\pi * (6 - 0.938194 * 0.5)^2}{4}} * 1.35 \leq \frac{480}{1.25}$$

$$F_m = \frac{480}{1.25} * \frac{\frac{\pi * (6 - 0.938194 * 0.5)^2}{4}}{1.35} = \frac{480}{1.25} * \frac{24.03}{1.35} = \boxed{6835.2 \text{ N}}$$

- Càlcul del parell de muntatge.

$$M_m = 0.2 * F_m * d$$

$$M_m = 0.2 * 6835.2 * 0.006 = \boxed{8.2 \text{ Nm}}$$

- Càlcul de la força a tallant.

$$\tau_{max} = \frac{4}{3} * \frac{F_{transversal}}{A_t}$$

$$\tau_{max} = \frac{4}{3} * \frac{410.5 \text{ N}}{\frac{\pi * (6 - 0.938194 * 0.5)^2}{4}} = \boxed{22.78 \text{ MPa}}$$

- Càlcul del factor de seguretat:

$$\sigma_{VM} = \frac{\sqrt{F_m^2 + 3 * \left(\frac{4}{3} * F_{trans}\right)^2}}{A_t} \leq \sigma_p$$

$$\sigma_{VM} * FS = \sigma_p$$

$$\sigma_{VM} = \frac{\sqrt{6835.2^2 + 3 * (547.3)^2}}{24.03} = \frac{6900.60}{24.03} = 287.17 \leq \sigma_p$$

$$FS = \frac{\sigma_p}{\sigma_{VM}}$$

$$FS = \frac{480}{287.17} = \boxed{1.67}$$

Observem que ens dóna un factor de seguretat de 1.67. Concloem que el pern que apliquem és correcte i no entrarà en fluència.

6.5.2. Aleró posterior

En el cas de l'aleró posterior ens centrem amb les forces aerodinàmiques calculades en l'estudi tridimensional amb el software Siemens NX perquè, com veiem en la taula 6.18, són superiors a les forces calculades en l'estudi bidimensional.

Taula 6.18. Comparativa de càrregues aerodinàmiques del l'aleró posterior en 2D i 3D

Velocitat (km/h)	Bidimensional		Tridimensional	
	F _L (N)	F _D (N)	F _L (N)	F _D (N)
60,0	49,04	3,94	59,54	13,57
70,0	73,54	4,79	81,25	19,00
80,0	108,69	5,51	106,33	24,82
90,0	143,66	6,82	134,74	31,42
100,0	178,44	8,35	166,66	38,81
110,0	219,45	10,07	201,91	46,96
120,0	264,40	11,95	240,59	55,91
130,0	315,34	14,04	282,71	65,64
140,0	365,99	16,23	328,29	76,12
150,0	422,76	18,72	377,34	87,62
160,0	482,22	21,50	429,86	99,96
170,0	547,02	24,38	485,88	112,85
180,0	617,49	27,24	545,74	126,51

Determinem en quin estudi tindríem la força resultant major.

2D:

$$R_{2D} = \sqrt{617.49^2 + 27.24^2} = 618.09 \text{ N}$$

3D:

$$R_{3D} = \sqrt{545.74^2 + 126.51^2} = 560.21 \text{ N}$$

Com en el cas anterior en l'estudi de l'aleró davanter, també obtenim la força resultant major en l'estudi amb els coeficients aerodinàmics bidimensionals. Degut a aquesta conclusió, ens centrem en fer l'estudi mecànic a partir del 2D.

Un cop tenim l'aleró en les dimensions reals com el que porta muntat el monoplaça determinem les parts més sol·licitades. La part que sofreix una major tensió és on hi ha els suports per sustentar l'aleró. Per realitzar l'estudi necessitem assignar-li el material amb el qual està fabricat que en el nostre cas la part central de l'aleró és de fibra de carboni i les aletes que serveixen de suport són d'alumini. Aquestes aletes exteriors van unides al perfil mitjançant perns.

Les parts que conformen l'aleró són bàsicament tres:

- El perfil alar que és de fibra de carboni.
- Les platines del suport que són de alumini.
- I les platines exteriors que són d'acer.

Taula 6.19. Propietats de l'aleró posterior.

Valores visualizados sobre la propiedad de las masas			
Volumen	=	5270107.179750707	mm ³
Área	=	966702.225927744	mm ²
Masa	=	15.153172889	kg
Peso	=	148.601862916	N
Radio de giro	=	367.487265598	mm
Centro de masas	=	394.986987947, 618.292644282, 58.128189050	mm

Un cop determinat els materials de l'aleró, obtenim un massa aproximada de 15.15 Kg i un pes de 148.60 N.

Per el càlcul mecànic de l'aleró ens centrem en fer el dimensionat dels passadors perquè puguin sostenir l'aleró i les seves forces.

Les forces influents en ell, són el seu propi pes ($P = 148.60 \text{ N}$), i les càrregues variables degudes a les forces d'arrossegament i d'anti-sustentació produïdes per la velocitat del monoplaça envers al flux continu d'aire.

Mallat de l'aleró.

El mallat el realitzem amb una malla tetraèdrica.



Figura 6.85. Mallat de l'aleró davanter.[Siemens NX]

Quan tenim el mallat general com veiem en la figura 6.85, hem de realitzar un mallat més fi al voltant dels punts crítics i per fer-ho dividim el perímetre dels forats en divisions de 2 mm com veiem en la figura 6.86.

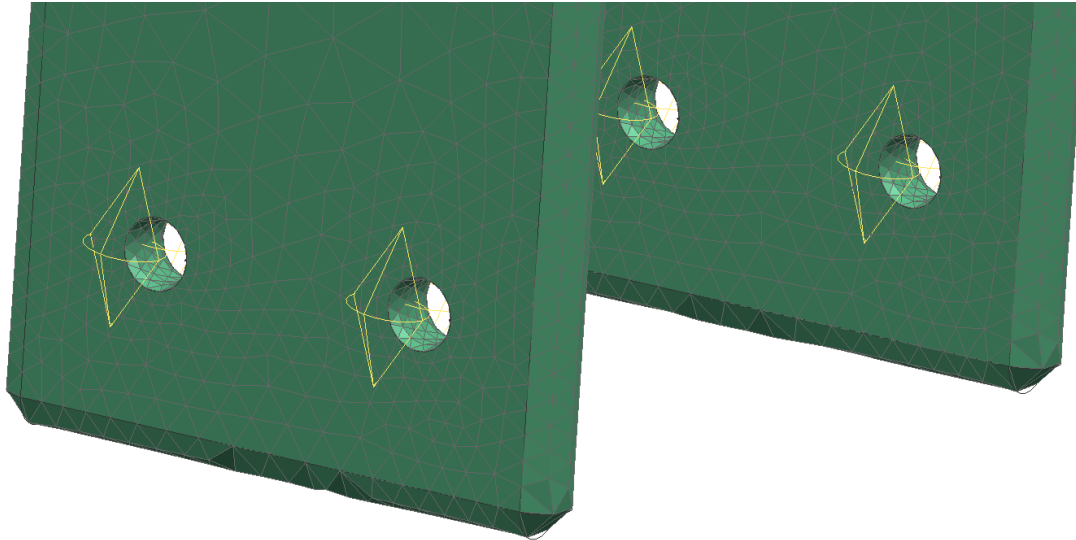


Figura 6.86. Afinament del mallat al voltant dels punts crítics. [Siemens NX]

Un cop finalitzat el mallat de la part crítica com veiem en la figura 6.86, apliquem les càrregues que suporta l'aleró en el cas més crític que seria quan el monoplaça va a la velocitat màxima $V = 180 \text{ km/h}$.

Distribució de les forces aplicades.

Els passadors suporten una càrrega resultant " \vec{R} " fruit de la càrrega Pes " \vec{P} " + la Força d'anti-sustentació " \vec{F}_L " i la força d'arrossegament " \vec{F}_D "

Per fer els càlculs i la dimensió dels 4 passadors ens centrem en el cas més crític que seria quan la velocitat fos la velocitat màxima que pot assolir el monoplaça $V_{max} = 50 \text{ m/s}$. En aquest cas les forces d'arrossegament i anti-sustentació implicades serien les calculades anteriorment;

- Càrrega degut al propi pes $P = 148.60 \text{ N}$
- Càrrega d'arrossegament $F_D = 27.24 \text{ N}$
- Càrrega de sustentació $F_L = 617.49 \text{ N}$

En definitiva els passadors hauríem de suportar una càrrega tallant total de

$$\vec{R} = \vec{P} + \vec{F}_L + \vec{F}_D = \sqrt{(148.60 + 617.49)^2 + 27.24^2} = \boxed{766.57 \text{ N}}$$

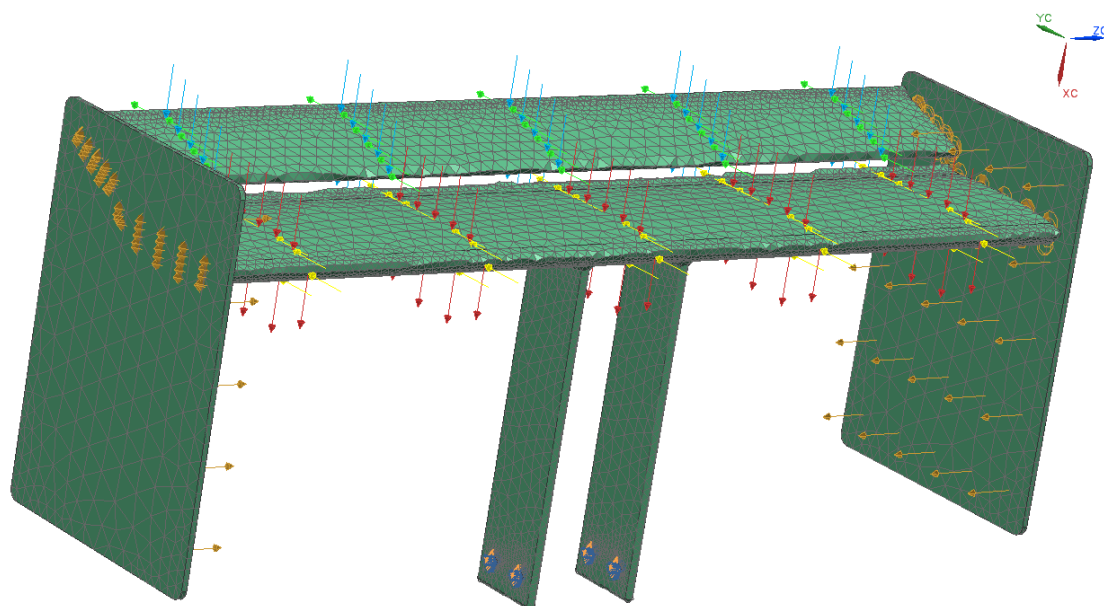


Figura 6.87. Aplicació de les càrregues aerodinàmiques i restriccions. [Siemens NX]

Un cop hem aplicat totes les forces i les restriccions que intervenen com veiem en la figura 6.87, procedim a solucionar el sistema amb l'opció de l'NX Nastran FEM. En aquest cas ho solucionem a partir de l'assemblatge. Les dades importants de la solució seria el desplaçament vertical en "Y" com veiem en la figura 6.88 i els esforços originats en els punts crítics.

Subcase - Static Loads 1, Paso estático 1
Desplazamiento - Nodal, X
Min : -0.021, Máx : 3.314, Unidades = mm
Deformación : Desplazamiento - Nodal Magnitud

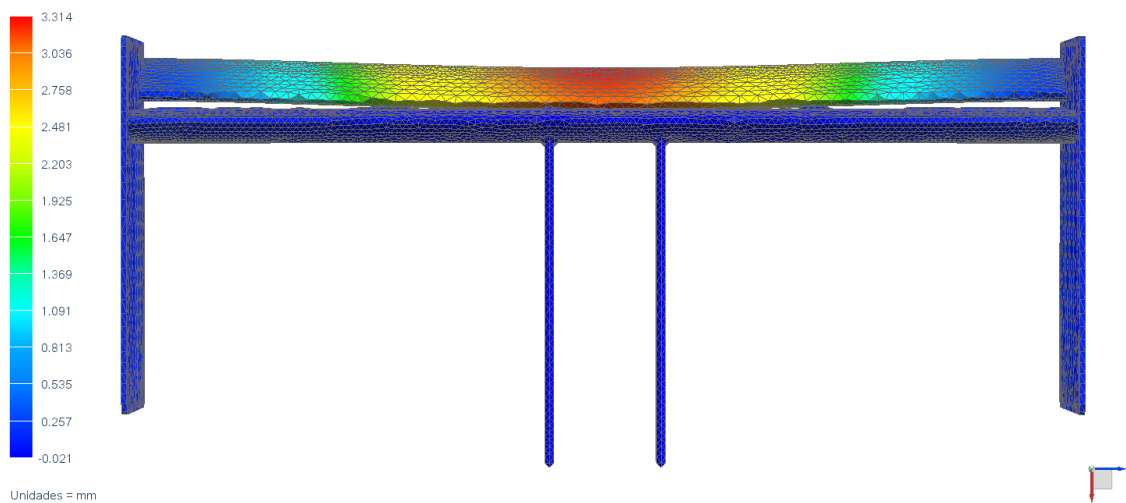


Figura 6.88. Desplaçament vertical en "X". [Siemens NX]

Observem en la figura anterior que el desplaçament màxim que sofreix l'aleró posterior es centra en la secció n^o1 i és de 3.314 mm situat al centre.

Pel que fa als esforços, podem observar en la figura 6.89 que degut a la configuració de les seccions de l'aleró hi ha un grup de suports que treballen més sol·licitats que els altres dos.

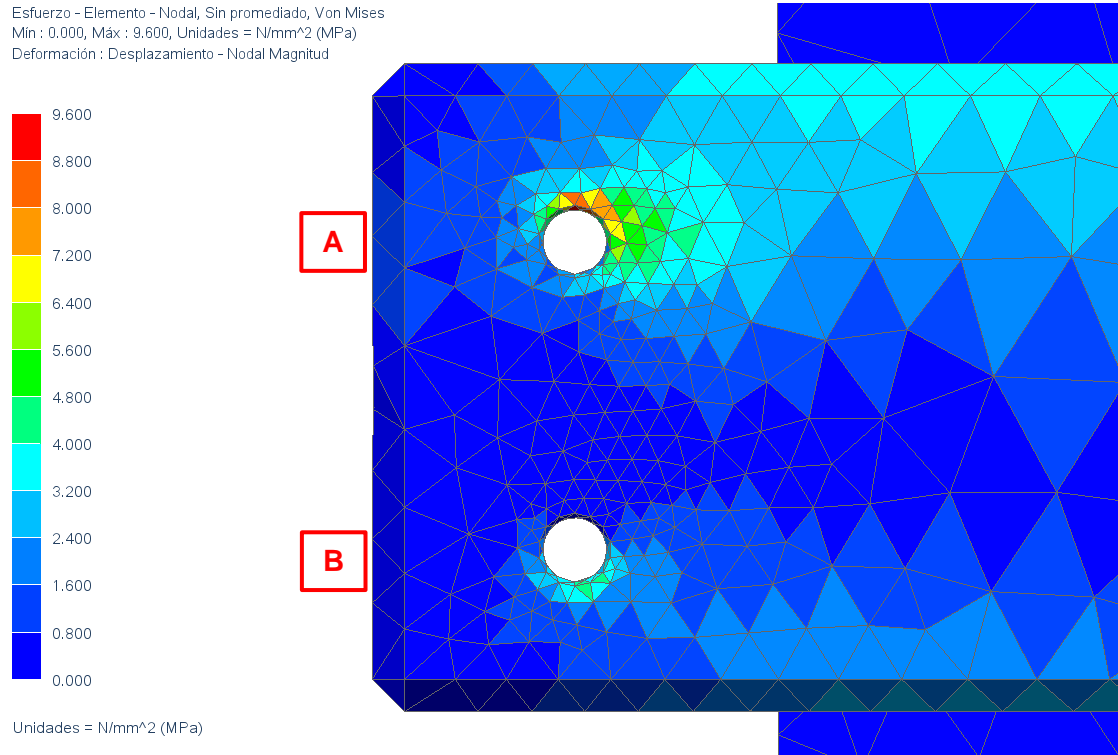


Figura 6.89. Representació del l'esforç de Von Misses. [Siemens NX]

S'ha obtingut un valor de Von Misses màxim de 9.60 MPa en el punt més crític a partir del programa.

Si determinem que l'alumini utilitzat té un límit elàstic de 85MPa, obtenim el coeficient de seguretat de les platines segons la teoria de fallada de la màxima energia de distorsió (TMED).

$$\sigma_{VM} \geq \sigma_{el}$$

$$\sigma_{VM} * FS = \sigma_{el}$$

$$FS = \frac{\sigma_{el}}{\sigma_{VM}} = \frac{85MPa}{9.60 MPa} = \boxed{8.85}$$

Aquest coeficient de seguretat és relativament elevat ja que nosaltres hem realitzat el càlcul a una velocitat màxima de 180km/h que és la velocitat que assoleix el monoplaça en aquests instants, en canvi el suport estava dissenyat per suportar velocitats majors i per conseqüència esforços majors.

Seguidament, procedirem a determinar les reaccions degudes a les càrregues a cada punt d'acollada per poder dimensionar el pern.

Taula 6.20. Reaccions calculades a partir del software NX.

Suport A (N)			Suport B (N)		
X	Y	Z	X	Y	Z
-762.685	-26.785	6.352	393.81	13.7	2.818

On el suport A admet un càrrega transversal de $Q_a = \sqrt{45.29^2 + 408^2} = 410.5 \text{ N}$

I el suport B admet una càrrega de $Q_b = \sqrt{393.81^2 + 13.7^2} = 394.05 \text{ N}$

Les reaccions en l'eix "Z" són produïdes per l'efecte de la flexió que sofreix l'aleró. Aquest fet repercuteix en els punts d'acollada. La càrrega total suportada per els 4 cargols es reparteix per els cargols (A) en $Q_a = 410.5 \text{ N}$ i pels cargols (B) $Q_b = 394.05 \text{ N}$.

Els cargols que estaran més sol·licitats seran els cargols "A" i procedirem a dimensionar-los. El fet de dimensionar tan sols aquests cargols i no suposar uns cargols inferiors als altres punts de collada és una qüestió de minoració en el procés de fabricació. Per aquest fet utilitzarem el mateixos cargols tant per la unió "A" com per la unió "B".

Calculem a partir de l'equació de disseny dels cargols;

$$\frac{F_m}{A_t} * 1.35 \leq \frac{\sigma_p}{FS}$$

On

- F_m és la força de muntatge (N)
- A_t és l'àrea total (mm^2).

$$A_t = \frac{\pi * d_t^2}{4}$$

i

$$d_t = d_{nominal} - 0.938194 * pas$$

- σ_p és la tensió del límit elàstic (N/mm^2) del cargol utilitzat que podem obtenir en la taula 45.

Taula 6.21. Característiques mecàniques dels acers dels cargols, femelles i volanderes.

Clase	4.6	5.6	6.8	8.8	10.9
Tensión de límite elástico f_y (N/mm^2)	240	300	480	640	900
Tensión de rotura f_u (N/mm^2)	400	500	600	800	1000

- FS és el factor de seguretat que depèn;
 - Unions d'alta qualitat.
 - Rosca fina. FS = 1.25
 - Rosca normal. FS = 1.1
 - Unions de baixa qualitat. FS = 1.4

Proposem un cargol mètric M8x0.75 amb duresa 8.8 de rosca fina i calculem si ens és suficient.

- Càlcul de la força de muntatge.

Apliquem dades;

$$\frac{F_m}{\frac{\pi * (8 - 0.938194 * 0.75)^2}{4}} * 1.35 \leq \frac{640}{1.25}$$

$$F_m = \frac{640}{1.25} * \frac{\frac{\pi * (8 - 0.938194 * 0.75)^2}{4}}{1.35} = \frac{640}{1.25} * \frac{41.81}{1.35} = \boxed{15826.83 \text{ N}}$$

- Càlcul del parell de muntatge.

$$M_m = 0.2 * F_m * d$$

$$M_m = 0.2 * 15856.83 * 0.006 = \boxed{25.37 \text{ Nm}}$$

- Càlcul de la força a tallant.

$$\tau_{max} = \frac{4}{3} * \frac{F_{transversal}}{A_t}$$

$$\tau_{max} = \frac{4}{3} * \frac{410.5 \text{ N}}{\frac{\pi * (8 - 0.938194 * 0.75)^2}{4}} = \boxed{13.09 \text{ MPa}}$$

- Càlcul del factor de seguretat:

$$\sigma_{VM} = \frac{\sqrt{F_m^2 + 3 * \left(\frac{4}{3} * F_{trans}\right)^2}}{A_t} \leq \sigma_p$$

$$\sigma_{VM} * FS = \sigma_p$$

$$\sigma_{VM} = \frac{\sqrt{15856.83^2 + 3 * (547.33)^2}}{41.81} = \frac{15885.14}{41.81} = 379.93 \leq \sigma_p$$

$$FS = \frac{\sigma_p}{\sigma_{VM}}$$

$$FS = \frac{640}{379.93} = \boxed{1.68}$$

Observem que ens dona un factor de seguretat de 1.68. Concloem que el pern que apliquem es correcte i no entrarà en fluència.

7. COMPARACIÓ DELS RESULTATS ENTRE L'ESTUDI BIDIMENSIONAL, LA SIMULACIÓ EXPERIMENTAL I LA SIMULACIÓ NUMÈRICA.

Comparem els resultats dels estudis que hem realitzat. Utilitzant un valor de velocitat del fluid de 22.6 km/h hem obtingut els següents valors de forces i coeficients aerodinàmics.

Taula 7.1. Comparació dels resultats obtinguts de la simulació experimental amb el càlcul bidimensional i la simulació numèrica a l'angle d'atac de 4°.

4°	Estudi bidimensional	Simulació numèrica	Simulació experimental
C_L	1.074	0.650	0.5088
C_D	0.015	0.117	0.3659
$F_L (N)$	8.92	5.40	4.23
$F_D (N)$	0.12	0.98	3.04

Finalment observem que els valors bidimensionals calculats, sense tenir en compte els efectes de volum, efectes de pressió entre altres, s'allunya de la realitat ja que ens proporciona un valor del coeficient de sustentació de $C_{Lt} = 1.074$ i un valor del coeficient d'arrossegament $C_{Dt} = 0.015$. En canvi els valors obtinguts en la simulació numèrica i la simulació experimental són més semblants i coherents.

De la simulació numèrica obtenim un valor de $C_{Lnum} = 0.650$, si el comparem amb el coeficient de sustentació obtingut experimentalment $C_{Lexp} = 0.5088$ ens adonem que ens trobem amb una variació del 21.72%.

$$\text{Variació } C_L = \frac{C_{Lnum} - C_{Lexp}}{C_{Lnum}} = \frac{0.650 - 0.5088}{0.650} = 0.2172 \rightarrow \mathbf{21.72\%}$$

El coeficient de sustentació en la simulació numèrica és un 21.72% major que el coeficient obtingut en el túnel de vent. El fet que els valors no siguin iguals és degut als errors experimentals del túnel de vent, l'afinament dels paràmetres del "solver" del programari Siemens NX com hem exposat anteriorment i les imperfeccions de la maqueta de l'aleró realitzada per l'estudi experimental.

En canvi, el coeficient d'arrossegament proporcionat pel túnel de vent és major degut també als defectes de les imperfeccions del model que hem utilitzat per realitzar l'estudi i els errors. Tot i així la variació és molt menor entre l'estudi experimental i numèric que amb l'estudi bidimensional.

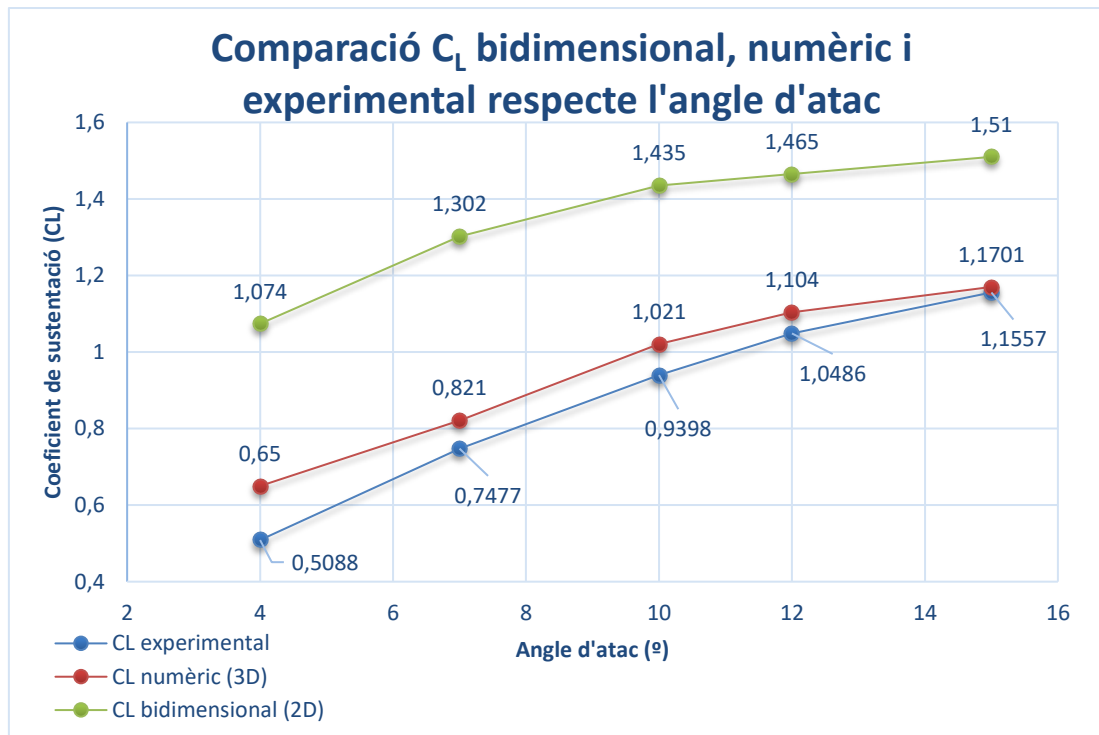


Figura 7.1. Comparació dels valors del coeficient de sustentació (C_L) bidimensional, numèric i experimental respecte l'angle d'atac. [Autor]

En la comparació gràfica dels coeficients de sustentació obtinguts en l'estudi bidimensional, la simulació numèrica i en la simulació experimental (figura 7.1) observem la seva tendència i variació entre ells que hem determinat anteriorment.

Com podem observar, a major angle d'atac del perfil la diferència del coeficient disminueix.

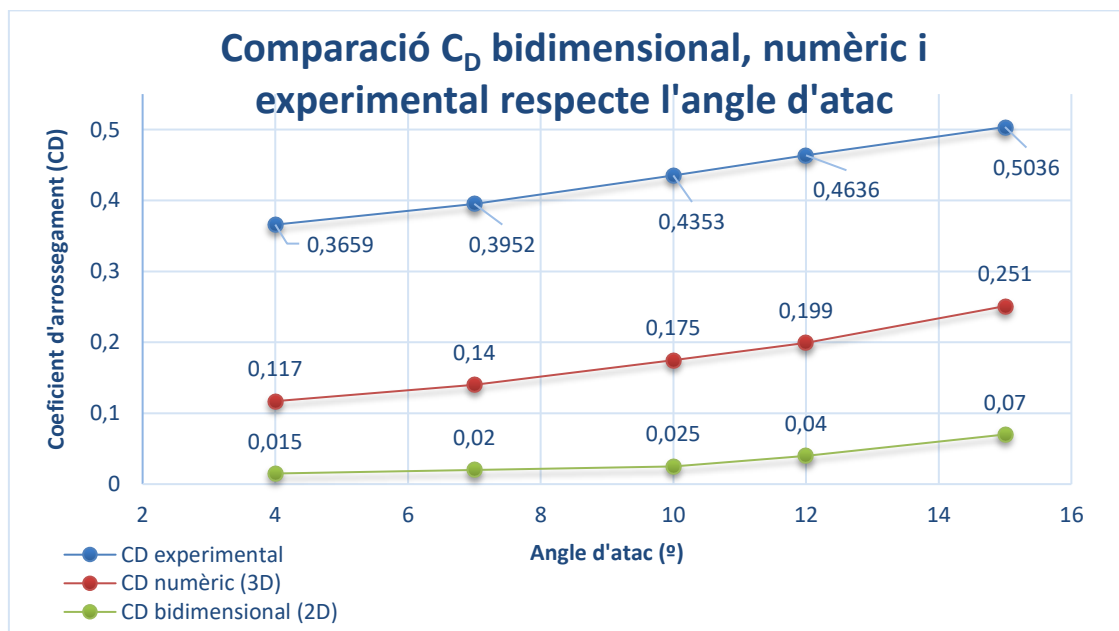


Figura 7.2. Comparació dels valors del coeficient d'arrossegament (C_D) bidimensional, numèric i experimental respecte l'angle d'atac. [Autor]

Citant la Taula 4.2, 4.4 i les Figures 4.8 4.9 de la tesina d'enginyeria aeronàutica de Rubén Emilio Campos [10], observem que a major angle d'atac de l'aleró menor és la diferència entre els coeficients obtinguts experimentalment i els coeficients obtinguts numèricament.

Tabla 4.2. Tabla comparativa de los valores de antisustentación

Ángulo de ataque	2D	3D	Túnel	Dif. 3D -Túnel
6º	1,77	1,29	1,15	0,14 (10%)
10º	2	1,56	1,38	0,18 (11%)
12º	2,11	1,68	1,51	0,17 (10%)
14º	2,15	1,79	1,63	0,16 (9%)
16º	2,22	1,88	1,75	0,13 (8%)
18º	2,15	1,95	1,88	0,07 (4%)
20º	2,09	2,01	1,9	0,11 (5%)

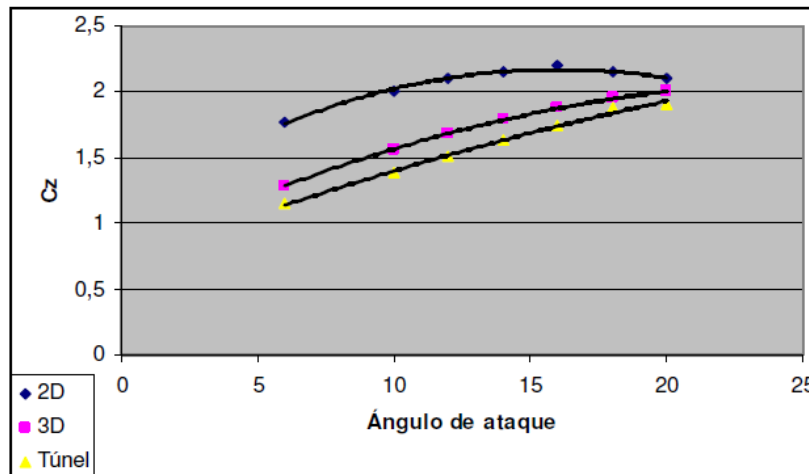


Fig. 4.8. Gráfica comparativa de los coeficientes de antisustentación en función del ángulo

Si comparem els nostres resultats amb els resultats de la tesina citada [10] observem que mantenen la mateixa tendència tot i que la diferència dels valors entre la simulació experimental i la simulació numèrica es major.

Tabla 4.4. Tabla comparativa de los valores de resistencia

Ángulo de ataque	2D	3D	Túnel	Dif. Túnel – 3D
6º	0,08	0,16	0,19	0,03 (18%)
10º	0,12	0,20	0,23	0,03 (18%)
12º	0,16	0,25	0,30	0,05 (20%)
14º	0,19	0,32	0,37	0,05 (15%)
16º	0,22	0,39	0,45	0,06 (15%)
18º	0,26	0,47	0,55	0,08 (17%)
20º	0,31	0,55	0,63	0,08 (14%)

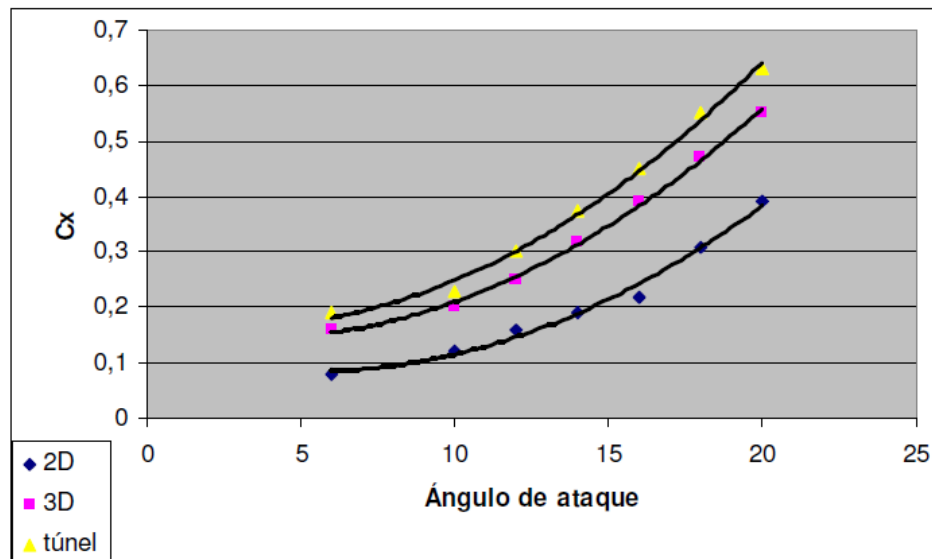


Fig. 4.9. Gráfica comparativa de los coeficientes de resistencia en función del ángulo

En referència al coeficient d'arrossegament, també es manté la diferencia entre els diferents estudis tot i que la variació en el nostre cas es superior, degut, sobretot, al tipus de subjecció del perfil i els possibles errors en el túnel de vent.

8. PRESSUPOST

Després de saber totes les modificacions estudiades i necessàries per obtenir millora en l'àmbit de l'aerodinàmica del Fórmula Renault Mygale '96 exposarem un desglossament orientatiu del pressupost necessari amb el seu preu final per les pertinents modificacions.

- *Aleró davanter.*

Taula 8.1. Desglossament del pressupost orientatiu per la fabricació i aplicació de les modificacions de l'aleró davanter.

<i>Material</i>	<i>PVP (€)</i>	<i>Unitats</i>	<i>Mà d'obra (€)</i>	<i>Cost (€)</i>
<i>Disseny aleró</i>	15	30 h		450
<i>Fabricació Aleró davanter</i>	300	1	150	450
<i>Fabricació aletes aleró</i>	50	2	100	200
<i>Pern M6 6.4</i>	0,45	4		1,8
<i>Volandera M6</i>	0,25	8		2
<i>Femella M6</i>	0,3	4		1,2
<i>Muntatge</i>			100	100
<i>Total aleró davanter</i>				1.205 €

La fabricació dels alerons serà a càrrec de l'empresa "Magma Composites", especialista en fabricació i modelatge de peces de fibra de carboni. Tots els pern i peces metàl·liques de subjecció serà a càrrec de l'empresa "WURTH" i el disseny i muntatge serà a càrrec de l'autor.

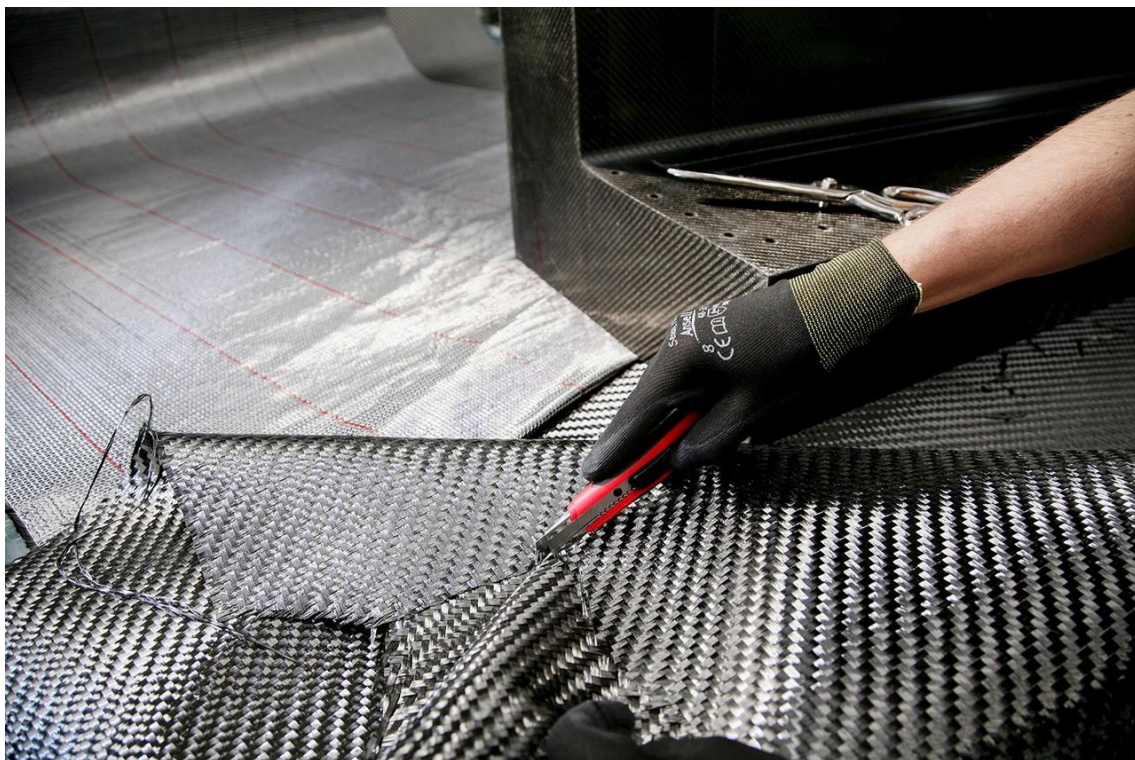


Figura 8.1. Fabricació utilitzant la fibra de carboni. [30]

Referent a l'aleró posterior, les peces amb fibra de carboni com és el compartiment del motor, biela i manovella també serà a càrrec de l'empresa "Magma Composites", les parts metàl·liques de subjecció de l'empresa "WURTH" i els sensors, cablejat i placa arduino de "RS Componentes".

- Aleró posterior.

Taula 8.2. Desglossament del pressupost orientatiu per la fabricació i aplicació de les modificacions de l'aleró posterior.

Material	PVP (€)	Unitats	Mà d'obra (€)	Cost (€)
Disseny aleró	15	60 h		900
Motor	120,6	2		241,2
Pern M6 6.4	0,45	4		1,8
Volandera M6	0,25	8		2
Femella M6	0,3	4		1,2
Fabricació compartiment	80	2	120	280
Biela	4,5	2		9
Manovella	4,5	2		9
Placa Arduino	23	1	300	323
Sensor fre	15	1		15
Sensor volant	21	1		21
Sensor velocitat	14	1		14
Relé	3,2	2		6,4
Circuit elèctric	3	1		3
Muntatge i ajust			250	250
Total aleró posterior				2.076,6 €

Tots els preus inclouen l'IVA.

Taula 8.3. Resum del cost total del pressupost.

ALERÓ DAVANTER	ALERÓ POSTERIOR
1.205 €	2.076,60 €
TOTAL: 3.281,60 €	

9. IMPACTE AMBIENTAL

En aquest apartat hem utilitzat la bibliografia [31], [32], [33]

La implementació de l'ús de sistemes aerodinàmics actius com el disseny del sistema "DRS" que hem presentat anteriorment, aplicat a vehicles comercials i quotidians podria suposar una disminució del consum de combustible. Aquesta disminució del consum, vendria donada pel fet que disminuïm la resistència a l'avanç; disminuint la força d'arrossegament (F_D).

Segons l'institut d'estadística de Catalunya (IDESCAT), a l'any 2017 s'han matriculat 260.831 turismes tan sols a Catalunya i 1.341.627 turismes a nivell nacional. Amb aquestes dades ens adonem que cada any es van matriculant més vehicles. Si ens centrem que les reduccions d'emissions estan controlades i van disminuint a mesura que es dissenyen nous motors de combustió interna (MCIA) més eficients, el nostre sistema aerodinàmic actiu podria ajudar a aquesta reducció.

Per altra banda, en aquest projecte ens hem basat en la contractació d'empreses que tinguin reconeixements i certificats amb gestió mediambiental com és l'ISO 14001 i en gestió de qualitat com és l'ISO 9001.



Figura 9.1. Acreditacions AENOR. [31]

Pel que fa al reciclatge dels materials utilitzats un cop finalitzada la seva vida útil, ens centrem amb la fibra de carboni. Aquest és un material poc reciclable tot i que s'ha creat una patent d'un sistema capaç de reciclar el 100% [32]. Actualment per reciclar aquest material tindríem que portar-lo a la deixalleria més propera i aquesta transportaria el material seleccionat a una planta de reutilització d'aquesta fibra.[33]

Per tant, hi hauria una reducció de l'impacte mediambiental per la disminució dels gasos contaminants, els processos de fabricació i la gestió de les empreses col·laboradores.

10. CONCLUSIONS

L'objectiu principal d'aquest projecte era realitzar un estudi aerodinàmic dels alerons davanter i posterior d'un Fórmula Renault Mygale per obtenir els punts febles i aplicar una millora aerodinàmica. En primer lloc, per la determinació dels coeficients i forces aerodinàmics, es va optar per realitzar un estudi bidimensional previ dels alerons. Per a comprovar la validesa dels resultats obtinguts, posteriorment, es va realitzar un estudi experimental utilitzant un túnel de vent. Finalment, en vistes a poder obtenir els coeficients i forces una vegada proposades les modificacions a realitzar sense haver de fer experimentació, es va fer la modelització i simulació numèrica mitjançant "CFD", comprovant que els resultats obtinguts sense modificacions en els alerons es trobessin dins uns marges reals.

Un cop obtinguts els resultats dels tres estudis realitzats hem pogut plantejar les següents conclusions;

- Respecte a l'ajust de les càrregues aerodinàmiques:
 - Estudi bidimensional.
 - A partir de l'estudi bidimensional tan sols hem pogut obtenir uns resultats orientatius que s'allunyen de la realitat. Tot i així, ens ha servit per determinar la importància d'alguns paràmetres com són l'angle d'atac, la corda i envergadura de l'ala i la variació del perfil.
 - Simulació experimental.
 - Per realitzar un estudi experimental amb un mínim d'error el més important ha estat la preparació. El modelatge del models que hem utilitzat per l'experimentació, la impressió 3D i el post-processament.
 - Els valors obtinguts en la simulació experimental estan dins el marge que esperàvem. Els valors experimentals presenten variacions notables respecte als coeficients i forces d'arrossegament.
 - El coeficient d'arrossegament obtingut es veu incrementat per les imperfeccions del model, com són:
 - els punts i suports de subjecció,
 - la rugositat de la superfície, que en models d'escala reduïda és important
 - els suports que utilitza el túnel de vent per subjectar el perfil
 - Un altre punt important a tenir en compte és el tipus de túnel de vent utilitzat i l'estat dels aparells de mesura. En el nostre cas hem utilitzat un túnel amb la cambra d'assajos oberta i que és utilitzat pels estudiants de l'Escola Politècnica Superior de Terrassa per realitzar pràctiques d'aeronàutica.

- Hem pogut comprovar que els valors obtinguts amb la simulació experimental, tant dels coeficients de sustentació com del coeficient d'arrossegament són vàlids i coherents.
- Simulació numèrica tridimensional.
 - Avui en dia, els programes de simulació numèrica CFD estan desenvolupats de manera que intenten representar la realitat (amb uns valors d'error d'aproximadament del 21% segons el nostre estudi).
 - Les simulacions tridimensionals realitzades ens proporcionen una similitud amb les simulacions experimentals en el túnel de vent.
 - Es pot considerar que al treballar amb un software CAD la precisió dels elements aerodinàmics dissenyats és extremadament correcta, tan sols pot tenir variacions en la simulació CFD degut al seu mallat i la seva solució. En canvi, en la simulació experimental es necessita un model fabricat manualment i amb cert grau d'error de fabricació.
 - Hem pogut comprovar que els valors obtinguts amb la simulació numèrica, tant dels coeficients de sustentació com del coeficient d'arrossegament són vàlids i coherents.
- Respecte a les millores aplicades als alerons:
 - Aleró davanter
 - Referent a l'increment d'àrea planar i optimització de l'angle d'atac com a millores aplicades a l'aleró davanter, hem determinat que l'increment de la força d'anti-sustentació és molt major que l'increment de la força d'arrossegament per tant donem per vàlida la modificació com a millora.
 - El disseny de les aletes de l'aleró davanter ens ha proporcionat disminuir la força d'arrossegament total del monoplaça degut a l'impacte de l'aire amb les rodes davanteres. També donem per vàlida aquesta millora.
 - Resumint els objectius proposats per millorar l'aleró davanter, concloem que s'han complert.
 - Aleró posterior
 - Referent al disseny del sistema "DRS" actiu, hem obtingut un sistema variable que amb petites modificacions es podria instal·lar a qualsevol monoplaça que tingui un aleró posterior de doble perfil.

- Un dels grans inconvenients que ens hem trobat en el disseny del sistema “DRS” és que el parell motor necessari per moure l'aleró en tot moment a la velocitat màxima del monoplaça és excessivament gran. Per aquest motiu, hem redissenyat la configuració del “DRS” i hem implementat dos motors; un a cada costat.
- Tot i així, el nou sistema “DRS” actiu dissenyat aplica certa millora respecte al “DRS” utilitzat en la Fórmula 1 pel fet que és ajustable en tot moment, depenent de les condicions del circuit i dels paràmetres del monoplaça.
- Finalment, determinem que les modificacions efectuades en l'aleró posterior han obtingut un increment de les càrregues aerodinàmiques (F_L i F_D). L'increment degut a la força d'anti-sustentació (F_L) és superior a l'increment de la força d'arrossegament (F_D). Aquest fet ens afirma que les modificacions efectuades a l'aleró posterior són millores.

Un cop exposats tots els punts considerats concloem que s'han complit tots els objectius proposats a l'inici del projecte i que hem obtingut millores notables amb les modificacions que hem dissenyat dels dos alerons del Fórmula Renault Mygale '96.

Finalment, remarcar que el projecte s'ha enfocat com si fos un treball purament professional amb uns objectius clars i un estudi concís. A nivell personal m'ha aportat experiència en el software Siemens NX 10, en el software XFLR5 i en la metodologia experimental en túnel de vent.

11. AGRAÏMENTS

En primer lloc, agrair a Jaume Carbonell per aportar el seu monoplaça, les seves instal·lacions i els seus coneixements. També donar les gràcies a tots els amics, a Neus Campins per la seva paciència i a la meva família per donar-me ànims en tot moment i la gran oportunitat de poder viatjar a Vilanova i la Geltrú per estudiar el grau en enginyeria mecànica.

Agrair al Dr. Gustavo Raush pel seu tracte i amabilitat a l'hora de realitzar les proves en el túnel de vent i a l'ESEIAAT per oferir les instal·lacions. Així com, donar les gràcies al professorat de l'EPSEVG pel seu ensenyament durant aquests anys i per oferir les instal·lacions pel desenvolupament i fabricació del model 3D.

Finalment, agrair a la meva tutora Montserrat Carbonell per dirigir-me el treball, assessorar-me i confiar en mi pel seu desenvolupament.

12. BIBLIOGRAFIA

Llibres:

- [1] ASHRAE "Fundamentals Handbook". SI Edition. Chapter 5, (1997)
- [2] BARLOW, B. J.; RAE W. H., POPE A. "*Low Speed Wind Tunnel Testing*" (1999).
- [3] Çengel, Yunus A., Cimbala, John M.: "*Mecànica de fluidos Fundamentos y Aplicaciones*", 2a ed., Ed. McGraw-Hill, Mexico (2007)
- [4] COOK, N. J. "*Determination of the Model Scale Factor in Wind-Tunnel Simulations of the Adiabatic Atmospheric*" (1977)
- [5] Ortiz Berrocal, L., *Elasticidad*, McGraw-Hill, (1998), [ISBN 84-481-2046-9](#).
- [6] TSEITLIN, G.M.; M.I. SOLTS; V.M. POPOV "*Aerodinámica y Dinámica del vuelo de las aeronaves*". (1985).
- [7] White, Frank M. *Mecánica de fluidos*. 6a ed. Madrid: McGraw-Hill, (2008). ISBN 9788448166038.

Treballs acadèmics:

- [8] Campos López, Rubén Emilio. "*Diseño de un alerón de un vehículo de competición: comparación de la simulación aerodinámica numérica y la simulación aerodinámica experimental*". Julio 2008

Disponible a: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/5359/memoria.pdf>

- [9] Camúñez Llanos, Rubén. "*Elementos y dispositivos aerodinámicos en la Fórmula 1: parte central del vehículo*". Julio 2014

Disponible a:
<https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/24755/TFG%20memoria.pdf>

[10] *Jacob D., Ruben.* "Establecimiento de metodologías para la realización de CFD mediante NX y planteamiento de propuestas de re-diseño en la carrosería del vehículo para la competición "Shell eco-maratón 2010".

Disponible a: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/38074/TFM-%20Jacob%20Dazaruela%2C%20R..pdf?sequence=1>

[11] *Leon Deniz, Luis Alberto.* "Adaptación y análisis de perfiles para su uso como elemento aerodinámico en un fórmula SAE". Octubre 2007

Disponible a: <http://159.90.80.55/tesis/000137436.pdf>

[12] *Murillo Fuentes, Carlos.* "Estudio mediante CFD del alerón trasero de un monoplaça con el DRS abierto y cerrado en diferentes circuitos" 2016

Disponible a: https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/97742/TFG_-_Carlos_Murillo_-_Enric_Trillas.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Pàgines webs:

[13] http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html
(Data de consulta: 2/11/17)

[14] <http://formulauno-auto.blogspot.com.es/2012/03/que-es-el-drs.html#>
(Data de consulta: 2/11/17)

[15] <https://tecnicaf1.wordpress.com/2011/12/08/elementos-aerodinamicos-de-un-formula-1/>
(Data de consulta: 2/11/17)

[16] <https://www.emaze.com/@ALCRROLc>
(Data de consulta: 6/11/17)

[17] https://es.wikipedia.org/wiki/Capa_l%C3%ADmite
(Data de consulta: 6/11/17)

[18] <http://www.electroensaimada.com/servomotor.html>
(Data de consulta: 10/12/17)

[19] <https://www.arduino.cc/en/Reference/Servo>
(Data de consulta: 10/12/17)

[20] <https://es.rs-online.com/web/cps/>
(Data de consulta: 12/12/17)

- [21] <https://www.caranddriver.com/features/chaparral-2e-mechanicals-page-4>
(Data de consulta: 15/12/17)
- [22] <http://www.formula1.com>
(Data de consulta: 15/12/17)
- [23] https://es.wikipedia.org/wiki/Jaguar_XJR-12
(Data de consulta: 15/12/17)
- [24] <http://www.fluidcodes.com/event/7-introduction-to-ansys-fluent-training.html>
(Data de consulta: 20/12/17)
- [25] <http://formulauno-auto.blogspot.com.es/2012/03/que-es-el-drs.html>
(Data de consulta: 20/12/17)
- [26] <http://revistacar.es/audi-sport-performance-parts>
(Data de consulta: 2/1/18)
- [27] <https://es.wikipedia.org/wiki/V%C3%B3rtice>
(Data de consulta: 4/1/18)
- [28] <http://www.fuelwasters.com/2011/07/aerodinamica-vortex-y-flap-gurney.html>
(Data de consulta: 10/1/18)
- [29] <https://es.wikipedia.org/wiki/tunel-viento>
(Data de consulta: 10/1/18)
- [30] <https://noticias.coches.com/wp-content/uploads/2017/10/fibra-carbono-1.jpg>
(Data de consulta: 15/1/18)
- [31] <https://www.idescat.cat/pub/?id=aec&n=590&lang=es>
(Data de consulta: 20/1/18)
- [32] <http://invenes.oepm.es/InvenesWeb/detalle?referencia=P201530223>
(Data de consulta: 30/01/2018)
- [33] <https://automotivemanufacturingsolutions.com/es/proceso-materiales/recycle-route-carbon-fibre>
(Data de consulta: 30/01/2018)